



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

Dirección General de Estudios de Posgrado

Facultad de Ciencias Físicas

Unidad de Posgrado

**Implementación de una metodología para la  
identificación de bofedales usando datos imágenes  
satelitales Landsat - caso estudio: bofedal Chunal,  
cuenca alta del río Chillón**

**TESIS**

Para optar el Grado Académico de Magíster en Física con  
mención en Geofísica

**AUTOR**

Jorge Luis GARCIA DULANTO

**ASESOR**

Bram LEO WILLEMS

Lima, Perú

2018



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Garcia, J. (2018). *Implementación de una metodología para la identificación de bofedales usando datos imágenesatelitales Landsat - caso estudio: bofedal Chunal, cuenca alta del río Chillón*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---



## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN FÍSICA CON MENCIÓN EN GEOFÍSICA

A los treinta y un días del mes de enero del año dos mil dieciocho, siendo las once de la mañana, se reunió el Jurado Examinador, en el auditorio 304 de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, presidido por el señor Mg. Cesar Aguirre Céspedes como presidente, y con la asistencia de los siguientes miembros del Jurado Examinador:

Mg. Cesar Aguirre Céspedes	(Presidente)
Dr. Leónidas Ocola Aquise	(Miembro integrante)
Mg. Juan Niel Mendoza Nolorbe	(Miembro integrante)
Mg. Octavio Fashé Raymundo	(Miembro integrante)
Phd. Raúl Arnaldo Espinoza Villar	(Suplente)
Dr. Bram Leo Willems	(Asesor)

Para la sustentación oral y pública del trabajo de Tesis para optar el Grado Académico de Magíster en Física con mención en Geofísica, del bachiller **Jorge Luis Garcia Dulanto** con código N° 12137012.

Después de darse lectura al expediente de Grado en el que consta haberse cumplido con todas las disposiciones reglamentarias, los señores Miembros del Jurado Examinador, atendieron a la exposición de la Tesis titulada:

**"Implementación de una Metodología para la Identificación de Bofedales usando Datos Imágenes Satelitales Landsat-Caso Estudio: Bofedal Chunal, Cuenca Alta del Río Chillón"**

Y formuladas las preguntas, éstas fueron absueltas por el graduando.

Acto seguido, en privado, el Jurado Examinador procedió a la calificación. El Presidente determinó el promedio de la calificación, obteniendo como resultado de:

*Muy BUENO (18) Dieciocho*

A continuación el Presidente del Jurado Examinador recomienda que la Facultad de Ciencias Físicas proponga que se le otorgue el Grado Académico de Magíster en Física con mención en Geofísica, al bachiller **Jorge Luis Garcia Dulanto**.

Siendo las *12:40 h.*, se levantó la sesión; recibiendo el graduando las felicitaciones de los señores Miembros del Jurado Examinador y público asistente.

Los Miembros del Jurado Examinador suscriben el Acta de sustentación de tesis en Lima, a los treinta y un días del mes de enero del año dos mil dieciocho.



*Dedico este trabajo a mis padres, Teobaldo y Josefina,*

*Que siempre me apoyan*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera muy especial al proyector PEER “Strengthening resilience of Andean river basin headwaters facing global change” y al Dr Bram Leo, por su apoyo e incorporación en el proyecto, por brindarme todas las facilidades para culminar mis estudios de maestría en Física de la facultad de ciencias físicas de la UNMSM. Agradezco a la faculta de ciencias físicas de UNMSM, al Laboratorio de Teledetección LABTEL liderado por el Dr. Joel Rojas Acuña. Agradezco al Dr. Leonidas Ocola por sus valiosas observaciones. Agradezco al Dr. Raúl Espinoza por su constante apoyo. Agradezco al laboratorio de Suelos de la facultad de ciencias física de la UNMSM por brindarme los equipos. Agradezco al Dr. Robinson I. Negrón Juárez por sus orientaciones. A Jhon Brayan Guerrero por sus sugerencias.

## RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo principal detectar los bofedales a más de 3800 msnm, de la cuenca del río Chillón (CRCH) para tal fin inicialmente se crearon dos métodos previas que sirvieron de antecedentes para generar la método final, denominada: método Índice de Bofedal (IDB).

Inicialmente se desarrollaron trabajos de campo con el objetivo de conocer y seleccionar algunos bofedales y elegir un bofedal piloto (BP), posteriormente estos bofedales fueron tomados como referencia para la validación de los mapas de bofedales generados. Para lograr los objetivos de la investigación se usó la herramienta de la teledetección, que es uno de los métodos geofísicos que se utilizan para la exploración interpretación y localización de recursos naturales. Se procesaron datos imágenes de los sensores TM, ETM+ y OLI que están bordo de los satélites Landsat, de los año 1986-2015, 30 años, una imagen por año, 30 imágenes. Inicialmente se trabajó la imagen correspondiente al año 2014, todos los mapas presentados en este trabajo son principalmente del año 2014.

La primera método previa aplicada para identificación de bofedales (denominada Método 1 método “endmember”s) está basada en la firma espectral de los bofedales, la firma espectral o signatura espectral es una de las características de todos los objetos y única para cada objeto, esta se produce una vez que la energía del Sol incide sobre el objeto, en base a esta característica es que se procedió a seleccionar firma espectralmente pura (enmember) para el bofedal, “endmember” roca y “endmember” suelo, con estos “endmember”s se realizó la clasificación usando la técnica Linear Spectral Unmixing (LSU), luego se determinó las áreas de los bofedales, validadas por los trabajos de campo, de esta manera se obtuvo los perímetros-GIS de bofedales (vector de bofedales)

La segunda método previa aplicada identificación de bofedales (denominada método 2 método Índices) fue realizada basándose en propiedades biofísicas de las bofedales, índices de vegetación NDVI (IDV), índice de agua NDWI (IDA), índice de inflarajos NDII (IDI) y Índice de sequía NDDI (IDS) esto nos permitió visualizar el posible recorrido del agua según el relieve y las pendientes propias de la geografía de la cuenca. Posteriormente, tres índices fueron visualizados en , esta forma se zonificó los bofedales reconocidos en los trabajos de campo, luego para zonificar todos los bofedales, sobre

esta visualización en Red, Green, Blue, para IDI, IDV, IDA. Luego se realizó una clasificación supervisada (CLS) mediante el clasificador Paralelepípedos, presente en el software de procesamiento de imágenes ENVI. En los trabajos de campo se observó que una de las características de los bofedales es que se encuentran en terrenos de poca pendiente 0°C a 15 °C, luego se obtuvo también el perímetro-GIS de bofedales según este método.

Para el método final (método 3 Índice de bofedal (IDB)) se utilizó el perímetro-GIS de bofedales, con él se generó los índices biofísicos de bofedales. IDV, IDA, IDI, Finalmente haciendo correlaciones entre el porcentaje de fracción de “endmember” bofedal y los índices IDV, IDA, IDI de bofedales, y en base a estas correlaciones se propuso un Índice de bofedal (IDB) para generar mapas de bofedales; esta metodología sólo utiliza tres bandas ( $\rho$ NIR,  $\rho$  GREEN,  $\rho$ SWIR). Luego se aplicó el IDB para cada año de 1986-2015, se obtuvo así un perímetro-GIS de bofedales para cada año y se generaron los mapas de distribución de las áreas de los bofedales, y conociendo las áreas y con datos de trabajo de campo se pudo estimar un cálculo del volumen potencial de almacenamiento de agua (VPAA), además. También se generó el IDV, IDA y IDI solo de bofedales, luego se obtuvo el promedio de los valores para el IDV, IDA y IDI de los bofedales para cada año todos estos resultados se compararon con la precipitación y fenómenos extremos como El Niño, La Niña, Índice C, Índice E, etc

De los resultados obtenidos se puede indicar el índice que es más sensible para la zonificación de bofedales es el IDI, con el rango de valor mínimo 0.002, y como máximo valor 0.478.

## ACRÓNIMOS

ANA	Autoridad Nacional del Agua
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
EC	Electric Conductivity
DEM	Modelo de Elevación Digital
GPS	Global Positioning System
EM	“endmember”
EN	El Niño
ENF	El Niño Fuerte
ENM	El Niño Moderado
ENVI	Environment for Visualizing Images
EROS	Earth Resources Observation Systems
ESA	Agencia Espacial Europea
ETM+	Enhanced Thematic Mapper
FFLA	Fundación Futuro Latinoamericano
GIS	Geographic Information System
GLOVIS	Global Visualization
IDB	Índice de Bofedal
IOS	Índice de Oscilación del Sur
IRD	El Instituto de Investigación para el Desarrollo



LN	La Niña
LNf	La Niña Fuerte
LNm	La Niña Moderada
LPGS	Level 1 Product Generation System
L1T	Level 1T
LSU	Linear spectral Unimixing
MINAM	Ministerio del Ambiente
MEM	Ministerio de Energía y Minas
MSS	Multispectral Scanning System
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI (IDV)	Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación
NDDI (IDS)	Índice de Sequía de Diferencia Normalizada
NDII (IDI)	Índice de Diferencia Normalizada de Infrarrojos
NDWI (IDA)	Índice de Diferencia Normalizada de Agua
NIR	Infrarrojo Cercano
NLAPS	National Landsat Archive Production System
OLI	Operational Land Imager
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
pH	Potencial de Hidrogeno
SEDAPAL	Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima
SGCAN	Secretaría General de la Comunidad Andina
SWIR	short-wave infrared

UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
VPAA	Volumen Potencial De Almacenamiento De Agua
VWC	Contenido Volumétrico De Agua
WGS84	World Geodetic System 84

## ÍNDICE

RESUMEN .....	iii
ACRONIMOS .....	v
ÍNDICE.....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	xiv
LISTA DE TABLAS .....	xxiv

### CAPÍTULO 1 : INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4

### CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 BOFEDALES .....	6
2.2. CLS DE COVERTURAS, TIPO PARALELEPÍPEDO .....	7
2.3. <i>SPECTRAL MIXTURE ANALYSIS (SMA)</i> , ANALISIS DE MESZCLA ESPECTRAL .....	8
2.4. <i>LINEAR SPECTRAL UNMIXING (LSU)</i> , <i>DESMEZCLA ESPECTRAL LINEAL</i> ..	9
2.5 INDICES .....	11

### CAPÍTULO 3 : AREA DE ESTUDIO

3.1 CRCH .....	14
3.2 BP .....	15

### CAPÍTULO 4: METODOLOGIA

4. METODOLOGIA.....	20
4.1 TRABAJO DE CAMPO Y ELECCION DEL BP .....	22
4.2 DESCARGA DE LAS IMÁGENES .....	22
4.3 METODOLOGIA 1 PARA LA TELEDETECCION DE BOFEDALES: METODO “ENDMEMBER” .....	25
4.4 METODOLOGIA 2 PARA LA TELEDETECCION DE BOFEDALES: METODO INDICES.....	26
4.5 METODOLOGIA 3, FINAL, PARA LA TELEDETECCION DE BOFEDALES: MÉTODO IDB.....	28

### CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 CARACTERIZACIÓN DEL BP.....	31
5.1.1 PROPIEDADES FISICA .....	31
5.1.2 MUESTRAS DE SUELO DEL BP .....	33
5.1.3 CALCULO DEL pH .....	35
5.1.4 SEPARACION DE SUSTANCIAS ORGANICAS .....	36
5.1.5 PREPARACION PARA LA XRD .....	37
5.1.6 EJECUCIÓN XRD .....	38
5.1.7 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE XRD .....	39

5.2 ANÁLISIS A PARTIR DE LOS 3800 msnm .....	41
5.2.1 DEM CRCH. ....	41
5.3. MÉTODOS DE MAPEO DE BOFEDALES .....	42
5.3.1 MÉTODO “ENDMEMBER” .....	42
5.3.1.2 ELECCIÓN DE LOS “ENDMEMBER” .....	43
5.3.1.3 ELECCIÓN DEL “ENDMEMBER” BOFEDAL .....	44
5.3.1.4 CARACTERÍSTICAS DEL “ENDMEMBER” BOFEDAL .....	45
5.3.1.5 MAPEO DE CABECERA DE CRCH: MÉTODO “ENDMEMBER” .....	47
5.3.1.6 VALIDACIÓN DE LOS BOFEDAL, METODO “ENDMEMBER” .....	48
5.3.1.7 PERÍMETRO GIS DE BOFEDALES, METODO “ENDMEMBER” .....	51
5.3.2 METDODO INDICES .....	52
5.3.2.1 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL IDV .....	52
5.3.2.2 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL IDA .....	53
5.3.2.3 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL IDI. ....	55
5.3.2.4. VISUALIZACIÓN DE ÍNDICES IDV, IDA Y IDI EN Red, Green, Blue. ....	56
5.3.2.5. CLS.....	57
5.3.2.6 FACTOR DE CONFIABILIDAD $f$ .....	57
5.3.2.7 APLICACIÓN DE CLASIFICACIÓN PARALLELEPÍPEDO . ....	60
5.3.2.8 PENDIENTE DEL BP CHUNAL.....	61
5.3.2.9 GENERACIÓN DEL PERÍMETRO GIS DE PENDIENTES.....	62
5.3.2.10 GENERACIÓN DEL MAPA DE BOFEDALES, MÉTODO ÍNDICES (M.I).....	63
5.3.2.11 VALIDACIÓN DEL M.I. ....	64
5.3.2.12 OBTENCIÓN BOFEDALES MEDIANTE EL M.I .....	66
5.3.2.13 PERIMETROS DE BOFEDALES, MÉTODO INDICES EXPORTADOS AL GOOGLE EARTH.....	67



5.4 COMPARACIÓN DE AMBAS METODOLOGÍAS. ....	69
5.5 FUSIÓN DE AMBAS MÉTODOS.....	69
5.5.1 CORRELACION ENTRE LA FRACCION DE ENDMEMBER BOFEDAL Y LOS INIDICES IDV, IDA, IDI.....	69
5.5.1.1 CORRELACION ENTRE LA FRACCION “ENDMEMBER” BOFEDAL Y EL IDV DE LO BOFEDALE.....	70
5.5.1.2 CORRELACION ENTRE LA FRACCION “ENDMEMBER” BOFEDAL Y EL IDA DE LOS BOFEDALES .....	71
5.5.1.3 CORRELACION ENTRE LA FRACCION “ENDMEMBER” BOFEDAL Y EL IDI DE LO BOFEDALES. ....	73
5.5.2 ELECCIÓN DE LOS INDICES PRINCIPALES DEL BOFEDAL .....	74
5.6. ÍNDICE DE BOFEDAL (IDB) .....	75
5.6.1 GENERACIÓN DEL MAPA DEL BOFEDALES, METODO, IDB.....	76
5.6.2 VALIDACIÓN DEL ÍNDICE DE BOFEDAL.....	77
5.6.3 CLASIFICACIÓN DE BOFEDALES SEGÚN SU EXTENSIÓN. ....	79
5.7 EXTENCION DE BOFEDALES 1986 AL 2015 .....	80
5.7.1 PROFUNDIDAD ASUMIDA DEL BP CHUNAL .....	82
5.8 CALCULO DEL VOLUMEN POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE AGUA (VPAA) DE LOS BOFEDALES .....	83
5.8.1 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL VPAA .....	84
5.8.2. ECUACION DEL VPAA.....	85
5.8.3 SERIES DE TIEMPO DEL VOLUMEN POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE AGUA DE BOFEDALES DE LA CRCH .....	86
5.9 DISTRIBUCIONES TEMPORALES.....	87
5.9.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ÍNDICES PARA EL BP CHUNAL.....	87
5.9.2 DISTRIBUCION ESPACIAL DE ÍNDICES .....	88

5.9.2.1 MINIMO, MAXIMO Y PROMEDIO DEL IDV EN BOFEDALES. ....	88
5.9.2.2 MINIMO, MAXIMO Y PROMEDIO DEL IDA EN BOFEDALES. ....	89
5.9.2.3 MINIMO, MAXIMO Y PROMEDIO DEL IDI EN BOFEDALES.....	90
5.9.3 VARIACIÓN TEMPORAL DEL AREA LOS BOFEDALES Y LOS ÍNDICES .....	91
5.10 ANALISIS CON EL ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR (IOS) .....	92
5.10. 1 IOS Y LOS RESULTADOS PARA CRCH.....	93
5.10.2 IOS y ÁREA DE BOFEDALES, VPAA EN FUNCIÓN AL TIEMPO.....	94
5.10.3. SERIE DE TIEMPO DEL IOS y EL NDVI, NDWI, NDII PROMEDIO DE BOFEDALES .....	95
5.11 LOS BOFEDALES Y LOS INDICE C e INDICE E. ....	96
5.11.1 SERIES DE TIEMPO DE LOS INDICES E Y C CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	98
5.11.1.1. SERIE DE TIEMPO DEL INDICE E y ÁREA DE BOFEDALES EN FUNCIÓN AL TIEMPO .....	98
5.11.1.2. RELACIÓN DE INDICE E CON LOS INDICES IDV, IDA, IDI.....	99
5.11.1.3. INDICE C y ÁREA DE BOFEDALES EN FUNCIÓN AL TIEMPO.....	100
5.11.2 RELACIÓN DE INDICE C CON LOS INDICES IDV, IDA, IDI.....	101
5.12. ÁREAS DE LOS BOFEDALES Y PRECIPITACIÓN, VPAA .....	104
5.12.1 COMPORTAMIENTO DE LOS ÍNDICES Y LA PRECIPITACIÓN .....	105

## CAPÍTULO 6 :CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.....	108
RECOMENDACIONES .....	111
REFERENCIAS .....	113
ANEXOS.....	128
ANEXO A, LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN .....	128
ANEXO B.1, CARACTERISTICA DE LOS BOFEDALES .....	129
ANEXO B.2, FUNDAMENTOS FISICOS DE TELEDETECCION .....	134
ANEXO B.3, TELEDETECCIÓN BASADOS EN DATOS LANDSAT .....	163
ANEXO B.4, ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SATELITALES LANDSAT .....	166
ANEXO B.5, REFLECTANCIA PLANETARIA EN EL TECHO DE LA ATMOSFERA (TOA) DE TM, ETM+ y OLI .....	168
ANEXO B.6, CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA EN EL ESPECTRO VISIBLE USANDO FLAASH .....	169
ANEXO C, PARÁMETROS FISICOS Y QUIMICOS MEDIDOS MEDIDOS .....	175
ANEXO D, APLICACIÓN DEL MÉTODO LSU.....	180
ANEXO E, ÍNDICE DE SEQUÍA DIFERENCIA NORMALIZADA, NDDI.....	184
ANEXO F, PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN .....	186
ANEXO G, SISTEMA DE MONITOREO, PROGRAMA AGUA-ANDES.....	190
ANEXO DIGITAL ARCHIVO. ....	195

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	BP “Chunal” ubicado en el la CRCH. Foto, Fecha: 6 / 12/ 2013	7
Figura 2.2.	Clasificación del paralelepípedo en un espacio tridimensional (Quirós R. 2009 Pp 41)	8
Figura 2.3	Diagrama de “Linear Spectral Unmixing”. Modificado de Alfred, 2002, 187	10
Figura 3.1.	Zona de trabajo, CRCH	14
Figura 3.2.	Zonas de los trabajos de campo, y puntos GPS tomados el 6 de diciembre del 2013, Escala aproximada 1/55000.	18
Figura 4.1	Esquema general de la Metodología empleada para la teledetección espacial y temporal de bofedales.	21
Figura 4.2	Escena de la imagen Landsat 5 de la cuenca del río Chillón, perímetro GIS de color blanco delimita la cuenca del río Chillón	24
Figura 4.3.	Método 1	26
Figura 4.4	Método 2	27
Figura 4.5	Método 3, Método IDB	29

Figura 5.1.	A) Lugares de toma de muestra para los valores de T, CE, y el VWC, B) Detalles.	32
Figura 5.2.	Suelos recolectados del BP Chunal	34
Figura 5.3.	pH de las muestras, fecha 27 /8/2014.	36
Figura 5.4.	Esquema simplificado para separar la materia orgánica. Fotografías de fecha 23 /2/2015	37
Figura 5.5.	Acondicionamiento de los suelos para XRD.	38
Figura 5.6.	Maquina XRD.	39
Figura 5.7.	XRD de la muestra I	40
Figura 5.8.	XRD de las 5 muestras.	48
Figura 5.9.	DEM, CRCH.	41
Figura 5.10.	DEM, parte alta CRCH	41
Figura 5.11.	A) Parte alta CRCH, SWIR 2( R), NIR(G), RED(B). B) Zona cercana a trabajos (campo) y BP Chunal, rectángulo amarillo.	42
Figura 5.12.	Elección de las firmas espectrales que fueron utilizadas como “endmember”s en el método de clasificación LSU.	43
Figura 5.13.	A) BP Chunal. (B) Toma de punto GPS y C) Firma espectral homogénea correspondiente, EM bofedal.	44
Figura 5.14.	Tres “endmember”, bofedal, roca y suelo.	45
Figura 5.15.	Firma espectral del “Endmember” bofedal.	46



Figura 5.16.	A) Bofedales CRCH, método “endmember”. B) Zona cercana a los trabajos de campo. Imagen Landsat 8 de fecha 5/7/2014.	48
Figura 5.17.	Validación de bofedales mapeados.	49
Figura 5.18.	Bofedales mapeados por el método “endmember” y exportados al Google Earth Pro. En círculo rojo el BP Chunal.	50
Figura 5.19.	A) Perímetro GIS de bofedales, parte alta CRCH mayores a 1 ha) para la fecha 5/7/2014. B) Perímetro GIS de bofedales de la zona cercana a los lugares de los trabajos de campo.	51
Figura 5.20.	A) IDV, CRCH; B) IDV trabajos de campo.	52
Figura 5.21.	A) IDA, CRCH; B) IDA trabajos de campo	54
Figura 5.22.	A) IDI,CRCH; B) IDI trabajos de campo.	55
Figura 5.23.	A) Imagen RGB, CRCH. B) RGB, trabajos de campo (fecha 5/07/2014)	56
Figura 5.24.	Factor de confiabilidad para elegir el algoritmo clasificador.	58
Figura 5.25.	A) CLS, CRCH. B) CLS en los trabajos de campo	60
Figura 5.26.	Pendiente del BP. Escala grafica 1/22000	61

Figura 5.27.	A) Imagen Paralelepípedo. B) Detalles	62
Figura 5.28.	Mapa de bofedales, método Índices cabecera de CRCH	63
Figura 5.29.	Validación del método Índices	65
Figura 5.30.	A) Bofedales M.I, CRCH. B) bofedales cercanos al BP	66
Figura 5.31.	A) Lugar próximo al BP. B) Lugar próximo al BP y bofedales. Escala aproximada 1/110000. Fecha de la imagen 5 de mayo del 2014.	67
Figura 5.32.	Se muestra una imagen del programa informático Google Earth en la cual se han colocado los perímetros de bofedales generado por el método Índices, color verde, también se observa los bofedales generados por el Ministerio de Ambiente, MINAM , color rojo. Escala gráfica 1/ 110000	68
Figura 5.33.	A) Bofedales CRCH. B) Variables para cada pixel	70
Figura 5.34.	Gráfico de la fracción EM bofedal vs. IDV de bofedales. La línea roja muestra la regresión lineal	71
Figura 5.35.	Gráfico fracción EM bofedal vs. IDA de bofedales, en línea roja se muestra la regresión lineal.	72
Figura 5.36.	Gráfico fracción EM bofedal vs. valor absoluto de IDA de bofedales, en línea roja se muestra la regresión lineal.	73

Figura 5.37.	Gráfico fracción EM bofedal vs. IDI de bofedales. La línea roja muestra la regresión lineal.	74
Figura 5.38.	A) IDB, CRCH. B) IDB lugar cercano al trabajo de campo, se observa que las zonas oscuras corresponde a las áreas de los bofedales	77
Figura 39.	Validación del Mapa de bofedales identificados por el Método IDB. Con imágenes del “Google Earth Pro”	78
Figura 5.40.	Distribución de bofedales, cantidad su tamaño en ha.	79
Figura 5.41.	Distribución de bofedales, valor porcentual según tamaño de bofedales en ha.	80
Figura 5.42.	Serie de tiempo del área total de bofedales CRCH, del 1986 al 2015.	81
Figura 5.43.	Esquema del potencial volumen de almacenamiento de agua del BP Chunal escala grafica 1/11000.	82
Figura 5.44.	Trabajos de campo realizados en Ayacucho por investigadores del IRD de Francia y el proyecto Agua-Andes registran profundidades de bofedales superiores a los 5 m. Fuente, <a href="http://www.agua-andes.com/articulos/ird-unsch-y-agua-andes-realizaron-campana-bofedales">http://www.agua-andes.com/articulos/ird-unsch-y-agua-andes-realizaron-campana-bofedales</a> . Fecha de adquisición 25/05/16	83
Figura 5.45.	VWC de bofedal a 2 m de profundidad, foto modificado de: <a href="http://www.agua-andes.com/articulos/investigadores-del-igp-unsch-y-agua-andes-se-reunen-campana-cabecera-cuenca-cachi">http://www.agua-andes.com/articulos/investigadores-del-igp-unsch-y-agua-andes-se-reunen-campana-cabecera-cuenca-cachi</a> , Fecha de acceso: 25/05/16	84

Figura 5.46.	Serie de tiempo del VPAA de los bofedales CRCH, del 1986-2015	86
Figura 5.47.	Rango de valores de los índices del BP Chunal. A) IDV. B) IDA y C) IDI. y sus rangos de variación	87
Figura 5.48.	IDV de bofedales	88
Figura 5.49.	IDA de bofedales	89
Figura 5.50	IDI de bofedales .	90
Figura 5.51.	Serie de tiempo de las área los bofedales y los índices IDV, IDA, IDI para el periodo 1986-2015.	91
Figura 5.52.	Evolución del IOS para el periodo 1986-2015. Fuente: Datos: <a href="http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtml1.shtml">www.bom.gov.au/climate/current/soihtml1.shtml</a> . Fecha: 15/09/2016	93
Figura 5.53.	Serie de tiempo del IOS (línea gris) y área de bofedales (verde cactus) CRCH del 1986 al 2015.	94
Figura 5.54.	Serie de tiempo del IOS y medias de IDV, IDA, IDI para los años 1986-2015	95
Figura 5.55.	Índice E para el periodo 1986 al 2015	97
Figura 5.56.	Índice C para el periodo 1986-2015.	97

Figura 5.57.	Serie de tiempo del Índice E y bofedales para CRCH (1986-2015).	98
Figura 5.58.	Serie de tiempo del índice E y el promedio de los índices IDV, IDA y IDI de los bofedales CRCH, del 1986 al 2015	99
Figura 5.59.	Serie de tiempo del Índice C y extensión de bofedales de CRCH para el periodo 1986-2015.	101
Figura 5.60.	Serie de tiempo del índice C y el promedio de los índices IDV, IDA y IDI de bofedales de CRCH del 1986-2015.	102
Figura 5.61.	Serie de tiempo de los fenómenos Niño y Niña y del promedio Índices IDV (en color verde), IDA (en color azul) y el IDI (en color guinda) de bofedales para CRCH del 1986 al 2015.	103
Figura 5.62.	Serie de tiempo para la Precipitación (plomo) y área (verde cactus) de bofedales para CRCH del 1986 al 2015.	104
Figura 5.63.	Serie de tiempo de la precipitación y el promedio de los índices IDV, IDA y IDI de bofedales para CRCH del 1986 al 2015.	105



Figura B.1.	(a) <i>Distichia</i> Turberas en Huancavelica (4756 msnm), abril de 2012; (b) los musgos de turberas, arbustos en Cajamarca; (c) prado turba en el Cusco (4000 msnm), enero de 2010; d) los prados corriente en el Cusco, (4200 msnm), enero de 2010	129
Figura B.2.	(a) <i>Distichia muscoides</i> y (b) <i>Plantago tubulosa</i> Decne	130
Figura B.3.	Fauna de los bofedales.	131
Figura B.4.	Animales que pastorean en los bofedales en Peru: (a) las alpacas y (b) las llamas (M.S. Maldonado Fonkén, 2014, pp. 8).	132
Figura B.5.	Componentes de la onda electromagnética incluyen una onda sinusoidal eléctrica ( $\vec{E}$ ) y una onda magnética similar ( $\vec{B}$ ) en ángulo recto, siendo ambos perpendicular a la dirección de propagación. Modificado de Thomas M. Lillesand et al., 2004, pp.16	135
Figura B.6	Las ondas electromagnéticas en el espacio libre.	136

Modificado de W. G. REES, 2012, pp.15

.

Figura B.7	Definición de los ángulos $\theta$ y $\phi$ para describir la distribución angular de la radiación. Modificado de W. G. REES, 2012, pp. 25	137
Figura B.8.	Construcción geométrica para explicar el concepto de Radiancia. Modificado de W. G. REES, 2012, pp. 26	138
Figura B.9	Irradiancia espectral del Sol (curva gris) y la irradiancia espectral de un cuerpo negro a 5800 K que subtiende el mismo ángulo sólido como el Sol (curva negra), modificado de Gueymard (2004). (W. G. REES, 2012. pp.34)	142
Figura B.10.	La función $f(x)$ se define en la ecuación (1.28). Se muestra la fracción del total de la radiación del cuerpo negro emite hasta $x = \frac{hc}{\lambda kT}$ (W. G. REES, 2012)	143
Figura B.11.	Distribución espectral de la energía radiada desde los cuerpos negros de diferentes temperaturas. Modificado de Thomas M. Lillesand et., al, 2004, pp. 20	145
Figura B.12	Distintas geometrías utilizadas en los experimentos de difracción de rayos X. B. D (Cullity and S. R. Stock, 2001)	146
Figura B.13	Interacciones energéticas. Modificado de Wim H. Bakker et., al, 2009, pp. 70	147
Figura B.14	Transmitancia atmosférica. Modificado de Wim H. Bakker et al., 2009, pp. 71	148

Figura B.15	Curvas de radiación del Sol y de un cuerpo negro a la temperatura del sol. Modificado de Wim H. Bakker et., al, 2009, pp. 73	149
Figura B.16	Definición de Absorción. Modificado de Sobrino, 2000	150
Figura B.17	La “scattering” de Rayleigh es causada por partículas más pequeñas que la longitud de onda (línea roja) y es máxima para las pequeñas longitudes mínimas (línea roja). Modificado de Wim H. Bakker et., al, 2009, pp 74	153
Figura B.18	El scattering de Rayleigh nos hace percibir un cielo azul durante el día y un cielo rojo al atardecer. Modificado de Wim H. Bakker et., al, 2009, pp. 75	154
Figura B.19	Los efectos directos e indirectos de las nubes en la teledetección óptica. Modificado de Wim H. Bakker et., al, 2009, pp. 77	156
Figura B.20	Angulos, Modificado de <i>Rahman and Dedieu</i> , 1994.	157
Figura B.21	Efectos atmosféricos sobre la superficie. Modificado de <i>Vermote et al.</i> , 2006	157
Figura B.22	Características de reflectancia espectral de los suelos. (Sobrino, 2000).	161
Figura B.23	Representación gráfica de Radiancia vs ND. (Markham y Barker, 1986)	167

Figura B.24	Librería espectral de los sensores, (a)TM, (b) ETM+ y (c) OLI	170
Figura B.25	Figura espectrales. Modificado, <i>Sobrino</i> , 2000.	171
Figura B.26	Formato de bandas de tipo BIP. Modificad de Canty, 2010. .	172
Figura B.27.	Formato de bandas de tipo BIL. Modificad de Canty, 2010.	172
Figura B.28	Formato de bandas de tipo BSQ. Modificad de Canty, 2010.	173
Figura B.29	Módulo FLAASH del software ENVI 4.5. Fuente: Elaboración propia.	174
Figura D.1	Selección del método de mapeo Linear Spectral Unimixing , incorporado en el software ENVI.	180
Figura D.2	Incorporación de los datos y pasos necesarios para la aplicación del LSU.	181
Figura D.3	Mapeo aplicando el LSU. Fracciones “endmember”s de un punto dentro del BP.	182
Figura D.4	Mapeo aplicando el LSU, el punto interior del BP con valor de fracción de “endmember” bofedal igual a 1.00.	183

Figura E.1	A) Distribución espacial del IDS, CRCH; B) IDS trabajos de campo	184
Figura E.2	IDS trabajos de campo y curvas a nivel.	185
Figura F.1	Estaciones meteorológicas obtenidas del Portal del SENMAHI fuente: <a href="http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi">www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi</a> Acceso 11/05/13.	186
Figura F.2	Serie de tiempo de precipitación total promedio anual por estación meteorológica, para CRCH. Fuente: Datos obtenidos de las Estaciones meteorológicas obtenidas del Portal del SENMAHI. <a href="http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi">www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi</a> . Acceso 11/05/13)	188
Figura F.3	Serie de tiempo de la precipitación anual CRCH. Fuente: Datos obtenidos del Portal del SENMAHI. <a href="http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi">www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi</a> . Acceso 11/05/13)	189
Figura G.1	Mapa de bofedales CRCH, Monitoreo a bofedales, Agua-Andes. <a href="http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo">http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo</a> <a href="#">Fecha de acceso 20/04/2017</a>	191
Figura G.2	Mapa de bofedales del departamento de Ayacucho, Sistema de Monitoreo de bofedales Agua-Andes.	192

<http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo> Fecha de acceso 20/04/2017

- |            |   |     |
|------------|---|-----|
| Figura G.3 | Mapa de bofedales del departamento de Junín, Sistema de Monitoreo de bofedales Agua-Andes. <a href="http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo">http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo</a> Fecha de acceso 20/04/2017   | 193 |
| Figura G.4 | Mapa de bofedales del departamento de Apurímac Sistema de Monitoreo de bofedales Agua-Andes. <a href="http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo">http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo</a> Fecha de acceso 20/04/2017 | 194 |

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Índices usados en el proceso de la zonificación de bofedales.	12
Tabla 2.	Coordenadas de los 38 puntos GPS.	16
Tabla 3.	Listado de las imágenes Landsat. Fuente: Los datos se descargó desde, <a href="http://glovis.usgs.gov/">http://glovis.usgs.gov/</a> Fecha de acceso: 15/12/2015	23
Tabla 4.	Mediciones de los parámetros fisicoquímicos.	33
Tabla 5.	Localización, muestreo, fecha: 1 de julio de 2014.	34
Tabla 6.	pH del muestras.	35
Tabla 7.	Resultados del factor de confiabilidad para elegir el tipo de CLS Donde $n$ = Numero de píxeles totales del BP Chunal. Para	59

el BP Chunal, n es 176.

Tabla 8.	Valores de los principales índices que zonifican a un Bofedal, IDV, IDA, IDI e IDB	87
Tabla B.1	Bandas de ondas espectrales que ofrecen las diferentes misiones Landsat y sensores (Lavender, Lavender, 2016, p. 64)	165
Tabla B.2	Descripción de las variables que interviene en la radiancia espectral (Markham y Barker, 1986)	168
Tabla B.3	Parámetros que ingresan al módulo FLAASH.	174
Tabla C.1	Criterios para evaluar la salinidad de un suelo, con base en su conductividad. Modificado de Vázquez y Bautista, 1993.	175
Tabla F.1	Estaciones meteorológicas CRCH. Fuente: Datos obtenidos en las Estaciones meteorológicas obtenidas del Portal del SENMAHI. <a href="http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi">www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi</a> . Acceso 11/05/13)	187



# CAPÍTULO 1

## 1.1 INTRODUCCION

Según la *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, en pocas décadas un cuarto de la población sufrirá por agua (UNESCO, 2003). Para la Secretaría General de la Comunidad Andina (SGCAN) en poco años millares de pobladores no podrán conseguir suficiente agua para sus actividades y este número de pobladores aumentará en los próximos 30 años (SGCAN, 2008).

La desglaciación en la región Andina ha sido ampliamente estudiado a lo largo de los últimos años (Ramirez, et al., 2001; Rabatel, et al., 2005; Rabatel, et al., 2008; Vuille, et al., 2008; Hastenrath, 2009; Jomelli, et al., 2009), reportando una tasa de crecimiento del retroceso del 40 % desde la década de 1980 causado por el calentamiento global (Ramirez, et al., 2001).

Los humedales son ecosistemas con funcionalidad hidrológica en vista de que almacenan las precipitaciones, traduciéndolas en un flujo continuo de agua superficial y subterránea, mejorando su calidad al actuar como filtros naturales que absorben contaminantes, proporcionan vida (Steven and Toner, 2004; Lagos et al., 2008). En vista de sus múltiples funciones, el 2 de febrero de 1971 se firmó en la ciudad de Ramsar (Irán), el Convenio de Ramsar: Es un tratado intergubernamental que proporciona el marco para la acción racional y la cooperación internacional para la conservación el uso racional de los humedales y sus recursos ([www.ramsar.org](http://www.ramsar.org)).

(Ramsar, [www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/temas/ecosistemas-y-conectividad/leg\\_texto\\_convenio Ramsar\\_tcm7-215107.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/temas/ecosistemas-y-conectividad/leg_texto_convenio Ramsar_tcm7-215107.pdf) . Fecha de acceso:25/7/2015)

Por su parte, los bofedales son humedales de altura y constituyen sistemas frágiles, en vista se alteran si no se cuidan de manera (Flores Cartagena, D., 2002). Se ubican en la región Puna desde los 3800 m s.n.m, hasta la línea de nieve de glaciares y a lo largo de las márgenes de los ríos y manantiales de los territorios andinos de Perú, Bolivia, Chile y Argentina (Gil, 2011). (La importancia de los bofedales está bien descrita en; (Salvador et al., 2014; MINAM, 2015; Prieto, et al., 2001; Alzérrec, 2001; Alegría,2005.

La presente investigación constituye un aporte al entendimiento del rol hidrológico de los ecosistemas de humedales de puna, también llamados bofedales, en las cuencas Andinas. Se desarrolló una metodología que fue validada *in situ*, mediante trabajos de campo en las zonas de bofedales Piloto Chunal (cuenca del río Chillón) y en los departamentos de Ayacucho, Apurímac, Junín, Huancavelica (<http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo>, fecha de acceso: 11/9/2016). La metodología permite la identificación y cuantificación del área de bofedales empleando datos imágenes de satélite Landsat. Mediante los indicadores obtenidos, se construyen mapas de distribución de humedales de su evolución espacial y temporal. Las series temporales de los bofedales, generadas son, particularmente útiles para el estudio comparativo con series de precipitación y temperatura, por ejemplo, y así poder inferir potenciales impactos de forzadores climáticos. Como caso estudio, se tomó la cabecera de la cuenca del Río Chillón, que es una de las tres principales cuencas que abastecen a la ciudad de Lima y Callao.

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI ), nota de prensa N° 0 99 del 9 de julio del 2015, el departamento de Lima es el que presenta la mayor concentración de habitantes del país, con 9 millones 835 mil habitantes al 30 de junio 2015, lo que representa el 32% de la población del país. Para hacerse una idea la densidad poblacional a nivel nacional es de 24,2 hab./ km<sup>2</sup>; mientras que la de la Provincia Constitucional del Callao es de 6 949,0 hab./km<sup>2</sup>, 281 veces más. Según la Fundación Futuro Latinoamericano (FFLA) Lima es una ciudad desértica, no cuenta con grandes ríos ni reservas de agua (FFLA, 2015).

El agua de la ciudad de Lima es abastecida por tres cuencas: Rímac, Chillón, y Lurín. En distrito limeño de Carabaylo, además se tiene como objetivos construir, reparación, mantenimiento y operación del sistema que optimiza las aguas superficiales y subterráneas del Río Chillón, a fin de atender el tratamiento y costo del agua que se entrega al Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL). Durante la estación seca el suministro proviene de las aguas subterráneas produce un caudal  $1,0 \text{ m}^3 / \text{s}$  durante los meses de mayo y noviembre, el sistema incluye 28 pozos ubicados a lo largo del río Chillón. (Chulluncuy, N., 2011).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Localización espacial y temporal de ecosistemas de bofedales de puna mediante técnicas de teledetección por satélite.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar la identificación espacial y temporal de ecosistemas de bofedales de puna mediante técnicas de teledetección por satélite la Cuenca del Río Chillón.
- Establecer las características físico- químicas de los ecosistemas de CRCH
- Realizar trabajos en campo para validar indicadores satelitales para la identificación y cuantificación del área de bofedales a partir del análisis de imágenes de los sensores TM, ETM+ y OLI

- Generar mapas de distribución de bofedales en la cuenca del Río Chillón.
- Identificar potenciales impactos de forzadores climáticos sobre la dinámica de los bofedales.

## CAPÍTULO 2

Para la realización de este trabajo fueron necesarios los aspectos teóricos que están en el Anexo B2. En el anexo B2 se encuentran los temas relacionados a: Los fundamentos físicos de la teledetección. Difracción de Rayos X (XRD), Interacción entre la materia y energía. Teledetección basadas en imágenes Landsat. Análisis de procesamiento de imágenes.

### 2.1. BOFEDALES

Los Andes se caracterizan por presentar una geografía muy compleja con condiciones climáticas y ecosistemas diversos (Sagástegui et al., 1999, Josse et al., 2009). En Perú, la principal característica que diferencian entre Páramo Andino, Jalca y la puna es la humedad. De los tres la puna presenta el área más grande; con precipitación anual menor que el páramo y la Jalca (Josse et al., 2009; Maldonado F. M.S., 2010; Anderson et al., 2011).

En varias partes de la sierra peruana, el bofedal Figura 2.1, es llamado también "oconal"; mas información de bofedales la encontramos en los trabajos de: Maldonado F. M.S., 2010; Cerrate (1979) reporta que de este tipo de humedal se encuentra desde 3,100 ms.n.m pero la mayoría de los autores coinciden que los bofedales se encuentran a más 3,800 ms.n.m (Rivas-Martínez y Tovar, 1982, Flórez Martínez 1992, Maldonado F. M.S., 2010, MINAM 2015). Sobre su extensión total, los bofedales en el Perú, se estimó para el año 2015 en 544 562 hectáreas, aproximadamente el 0,42% del país (MINAM 2015).



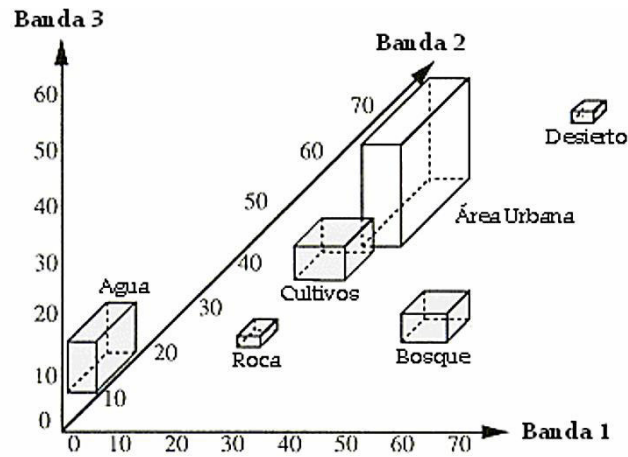
**Figura 2.1.** BP “Chunal” ubicado en el la CRCH. Foto, Fecha: 6 / 12/ 2013

Según Lumbreras (2006), las cercanías a los bofedales fueron muy importantes para la ubicación de las ciudades y aldeas en la Puna durante el proceso de evolución hace más de 5.000 años.

Una amplia información de las características de los bofedales se encuentra en el Anexo B1

## **2.2 CLS DE COVERTURAS, TIPO PARALELEPÍPEDO**

La CLS de imágenes satelitales del tipo Paralelepipedo es cuando se representa en un sistema de ejes coordenados, que está formado de la misma cantidad de ejes como los de la cantidad bandas tenga la imagen, como un Paralelepípedo, Figura 2.2. esquema de una clasificación tipo paralelepípedo ( Tso B., y P. M. Mather, 2001).



**Figura 2.2** Clasificación del paralelepípedo en un espacio tridimensional (Quirós R., 2009 p. 41)

La Figura 2.2 muestra una representación del método de Clasificación Paralelepípedo en un espacio tridimensional, se observa tres correspondientes a las bandas de la imagen

La regla de decisión está basada en un operador lógico booleano “y/o”: Si y sólo si la observación está contenida en el intervalo definido para todas las  $d$  bandas, entonces será asignado a la clase en cuestión. (Quirós R., 2009 p. 41)

$$X_c \in [\mu_c - \sigma_c, \mu_c + \sigma_c] \rightarrow X_c \in \text{clase } c \quad 1.1$$

$\mu_c = \text{Media de la clase } c$ ,  $\sigma_c = \text{Desviación estándar de la clase } c$

Si la observación  $X_c$  está contenida en varias clases lo más habitual es que se asigne a la clase del primer paralelepípedo en el que está contenido, con lo cual, el orden en el que se evalúen los paralelepípedos es de crucial importancia, no existiendo normalmente ninguna regla para definir el mejor orden (Quirós R. 2009 p. 41)

### **2.3 SPECTRAL MIXTURE ANALYSIS (SMA), ANALISIS DE MESZCLA ESPECTRAL**

El SMA es un método muy usado para conseguir la información de la clasificación por mezcla de píxeles (Lu et al., 2003). De acuerdo a Lunetta (1998), el SMA se basa en la conservación energía. Los píxeles son representados mediante un combinación lineal de las fracciones de área de firmas espectrales puros denominado “*endmember*” (EM) (Drake et al., 1999). Los EM son las firmas espectrales puras que se toman de referencia, los EM representan el 100% del campo del visual del sensor, un solo tipo de cobertura. (Lillesand y Kiefer, 2000).



La finalidad de SMA es encontrar la mezcla de reflectancia de una serie de espectros puros, “endmembers”, según los trabajo de Hapke, B. (1981) sobre análisis de la transferencia radiactiva en partículas en diferentes albedos (es decir, en general la reflectividad) y reflectancias, al convertir los espectros de reflectancia a albedos de “scattering” individuales. La expresión 1.2 (Mustard, J. F. y Pieters, C. M. 1987) expresa la relación de reflectancia bidireccional,  $R(i, e)$ , que es la potencia radiante recibida por unidad de área bajo un ángulo sólido, visto desde la dirección  $e = \cos^{-1}\mu_0$  de una superficie iluminada desde una dirección  $i = \cos^{-1}\mu_0$ , y promedio simple de albedo de “scattering”  $W$

$$R(i, e) = \frac{w/4(u+u_0)}{H(u)H(u_0)} \quad 1.2$$

Donde  $\mu_0 = \cos(i)$  y  $\mu = \sin(e)$  y  $H(u)$  es una función que describe múltiples scattering, entre las partículas que se pueden aproximar por

$$H(\mu) = \frac{1+2u}{1+2u(1-W)^{0.5}} \quad 1.3$$

El promedio simple de albedo del “scattering”, es una combinación lineal del albedo de una sola “scattering” de los componentes de “endmembers” ponderados por su fracción relativa como

$$W = \sum_{j=1}^n W_j(\lambda) f_j, \quad 1.4$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda espectral,  $n$  es el número de “endmember”, y  $f_j$  es la fracción relativa de componente  $j$ , por otro lado  $f_j$  es una función de la fracción de masa  $M_j$  la densidad,  $\rho_j$  y el diámetro,  $d_j$ , de las partículas del material “endmember”  $j$ , según

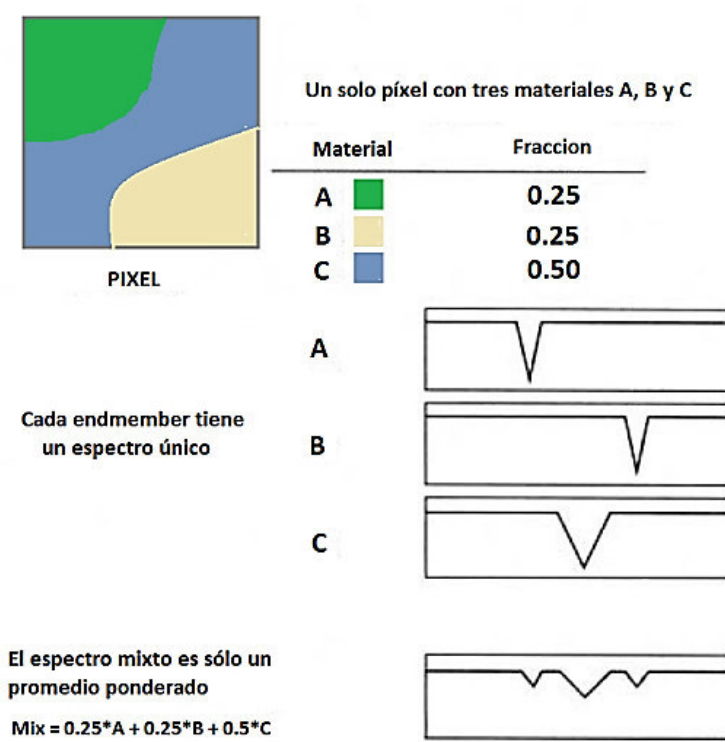
$$f_j = \frac{M_j / \rho_j d_j}{\sum_{j=1}^n M_j / \rho_j d_j} \quad 1.5$$

Estas ecuaciones permiten, por tanto, modelar las propiedades de reflectancia El promedio simple de albedo de “scattering” de las mezclas y forman la base de los estudios de modelado mezcla (Mustard, J. F. y Pieters, C. M., 1987).

## **2.4 LINEAR SPECTRAL UNMIXING (LSU), DESMEZCLA ESPECTRAL LINEAL**

Es el tipo más usado de SMA (Adams et al., 1985, Smith et al., 1990, Sabol et al., 1992, Settle y Drake ,1993; Small, 2001, 2003; Wu C, y Murray (2003, 2005). El LSU

selecciona firmas espectrales pertenecientes a conjuntos espectralmente puros en la imagen, EM. Es una técnica deconvolución que tiene por objetivo calcular, en la superficie, fracciones de un número de componentes espectrales puros, EM, al ser unidos dan origen la firma espectral mixta observada del píxel. Figura 2.3 Una combinación espectral lineal de EM es elegido para descomponer el espectro de reflectancia mixta de cada píxel, en fracciones de sus EM en las bandas (Alfred et al., 2002)



**Figura 2.3.** Diagrama de “Linear Spectral Unmixing”. Modificado de Alfred et al., 2002, pp. 187

La Figura 2.3 muestra que el píxel se compone de tres EM con espectros conocidos, A, B y C. El espectro mixto que se encuentran en el píxel es la media ponderada lineal de los tres EM. LSU utiliza los tres EM y el espectro mixto de píxeles para derivar la fracción relativa de A, B y C en el volumen limitado por el píxel.

Los EM deben ser seleccionados a partir de los valores extremos representativos de la imagen característica del espacio espectral, una correcta elección los EM dará como resultado el éxito del LSU (Tompkins et al., 1997). El análisis de imágenes se origina en la suposición de que los valores extremos representan los píxeles espectralmente puros, es decir compuestos sólo de uno EM (Roberts et al., 1998). El método ha sido utilizado en la observación de bosques (Lunetta, 1998), cubierta vegetal, forestal (Lu et al., 2003; Souza et al., 2003; Souza Jr. C. M., Bareto, P., 2000,. Algunos estudios han aplicado el LSU para caracterizar la cobertura del suelo como una mezcla de EM, relacionados con los datos del Landsat (Kauth y Thomas; 1976, Small; 2004). Ridd 1995 elaboró un modelo de LSU que consiste en la vegetación, superficie impermeable y el suelo.

Una suposición principal que hace el LSU es que la firma espectral de un pixel dado es la proporción ponderada de una combinación lineal de los espectros de EM (Smith et al., 1990). En el LSU el valor de un píxel en una imagen para una banda es igual a la suma ponderada de los valores de radiancia para esa banda de todos los objetos presentes en el píxel, Matemáticamente el modelo LSU (Weng et al., 2004), se expresa como

$$R_i = \sum_{j=1}^n f_j r_{ij} + \varepsilon_i, \quad 1.6$$

$$\sum_{j=1}^n f_j = 1 \text{ y } 0 \leq f_j \leq 1 \quad 1.7$$

donde  $i$  es el número de bandas espectrales utilizados;  $j = 1, \dots, n$  es el número de “endmember”s;  $R_i$  es la reflectancia espectral del píxel mixto en la banda  $i$ ,  $f_j$  es la fracción de la zona pixel cubierto por el EM  $j$ ;  $r_{ij}$  indica la reflectancia de la “endmember”  $j$  en la banda  $i$ ; y  $\varepsilon_i$  es el error residual en la banda  $i$ . (Weng et al., 2004)

## 2.5 INDICES

Como se simplifico en el resumen, en este trabajo de los índices son Índice de IDV, ecuación 1.8, que estima la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación (Rouse et al.,

1974; Jackson y Huete, 1991), que da información de la vegetación presente en la zona de estudio.

Para apreciar la humedad se generó mapas de distribución espacial del Índice de Agua (IDA), ecuación 1.9 (Gao, 1996);

Se generó mapas con distribución espacial del Índice de Infrarrojos (IDI), ecuación 1.10, (Hardisky et al., 1983). En vista de que el IDA muestra una mayor sensibilidad a la sequía que el IDV (Gao, 1996; Gu et al., (2007), se hace uso de ésta característica a través del Índice de Sequía de Diferencia Normalizada (IDS) ecuación 1.11 (Gu et al., 2007). La Tabla 1 muestra un resumen de los índices.

índices	Símbolo en este trabajo	Aplicación	Autor	Año	Ecuación
NDVI	IDV	Vegetación	Rouse et al.,	1974	$\frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}}}$ 1.8
NDWI	IDA	Humedad de Suelo	Gao	1996	$\frac{\rho_{\text{GREEN}} - \rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{GREEN}} + \rho_{\text{NIR}}}$ 1.9
NDII	IDI	Humedad del dosel	Hardisky et al.,	1983	$\frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{SWIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{SWIR}}}$ 1.10
NDDI	IDS	Sequía y recorrido del agua	Gu et al.,	2007	$\frac{\text{IDV} - \text{IDA}}{\text{IDV} + \text{IDA}}$ 1.11

**Tabla 1.** Índices usados en el proceso de la zonificación de bofedales.

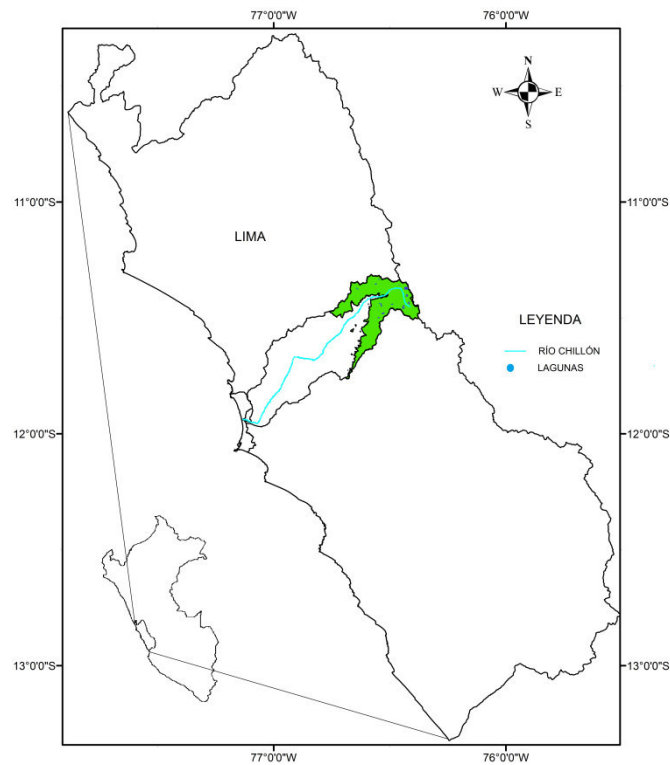
La Tabla 1 muestra un resumen de los parámetros biofísicos utilizados en este trabajo, en la tabla se muestra también la aplicación del índice, autor, año de publicación y la ecuación correspondiente al IDV, IDA, IDI, los resultados de índice IDS se muestran en el Anexo E.

.

## CAPÍTULO 3

### 3.1 CRCH

La CRCH está en Canta, que pertenece a Lima, Figura 3.1, podemos encontrar información de la cuenca en los trabajos de: Olarte, 2002; Suarez A. W, 2012; Amiel R.; 1964; entre otros.



**Figura 3.1.** Zona de trabajo, CRCH

La Figura 3.1 muestra el área de estudio, CRCH (área en color verde) que comprende zonas a partir de los 3800 ms.n.m.

Más detalles sobre la cuenca del río Chillón se encuentran en el Anexo A

### **3.2 BP**

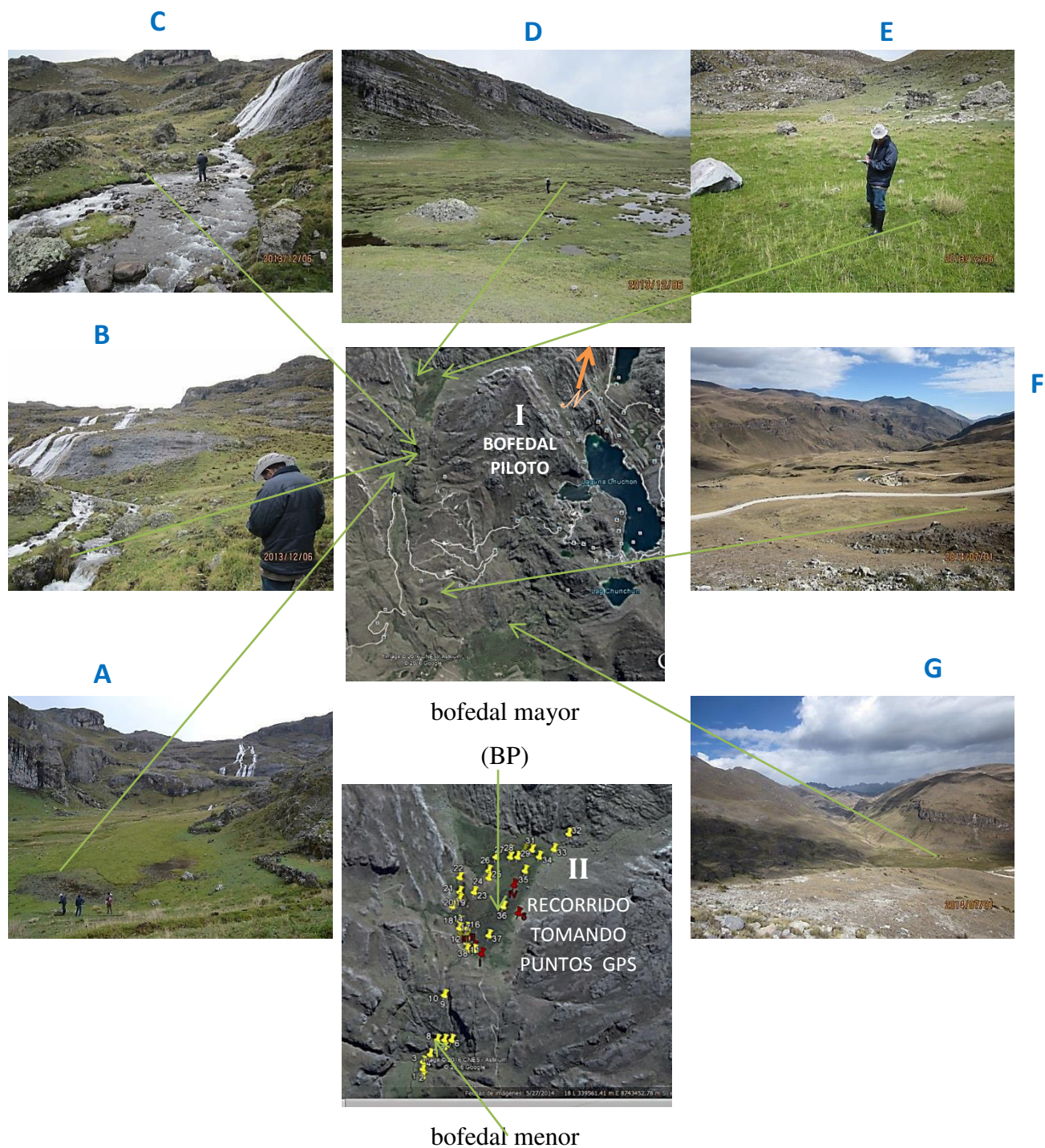
Se observó, *in situ*, Figura 3.2 los bofedales y al piloto y que sea este el punto de inicio del trabajo. Luego de una previa selección de gabinete, mediante las imágenes del programa informático Google Earth, se eligió uno que este conservado, de regular superficie y con poca presencia e influencia antrópica. Al llegar a:  $11^{\circ} 22.050'S$ , lon:  $76^{\circ} 27.663'O$ , (punto 1, Figura 3.2, imagen II) a una altura de 4249 ms.n.m, luego a poca distancia encontramos el BP, Chunal, con lat:  $11^{\circ} 21.774'S$ , Lon:  $76^{\circ} 27.562'O$  (punto 11, Figura 3.2, imagen II), a una altura de 4384 ms.n.m. en el recorrido se registraron 38 puntos GPS tomados con el instrumento de navegación portátil Garmin. Tabla 2

PUNTO	LATITU, Datum WGS84	LONGITUD, Datum WGS84	ALTURA ORTOMETRICA [ms.n.m] . Datum WGS84
1	11° 22.050'S	76° 27.663'O	4249
2	11° 22.034'S	76° 27.662'O	4251
3	11° 22.017'S	76° 27.662'O	4253
4	11° 22.001'S	76° 27.646'O	4262
5	11° 21.985'S	76° 27.613'O	4280
6	11° 21.969'S	76° 27.596'O	4296
7	11° 21.969'S	76° 27.613'O	4287
8	11° 21.969'S	76° 27.629'O	4281
9	11° 21.871'S	76° 27.612'O	4349
10	11° 21.871'S	76° 27.612'O	4347
11	11° 21.774'S	76° 27.562'O	4384
12	11° 21.757'S	76° 27.562'O	4384
13	11° 21.741'S	76° 27.579'O	4385
14	11° 21.725'S	76° 27.578'O	4386
15	11° 21.741'S	76° 27.562'O	4384
16	11° 21.725'S	76° 27.562'O	4385
17	11° 21.725'S	76° 27.562'O	4385
18	11° 21.709'S	76° 27.578'O	4387
19	11° 21.676'S	76° 27.595'O	4390
20	11° 21.660'S	76° 27.578'O	4388
21	11° 21.643'S	76° 27.578'O	4389
22	11° 21.611'S	76° 27.578'O	4394
23	11° 21.644'S	76° 27.545'O	4386
24	11° 21.611'S	76° 27.512'O	4388
25	11° 21.595'S	76° 27.512'O	4389
26	11° 21.562'S	76° 27.495'O	4386
27	11° 21.546'S	76° 27.462'O	4387
28	11° 21.563'S	76° 27.462'O	4386
29	11° 21.563'S	76° 27.446'O	4386
30	11° 21.547'S	76° 27.429'O	4389
31	11° 21.547'S	76° 27.413'O	4390
32	11° 21.514'S	76° 27.330'O	4418
33	11° 21.547'S	76° 27.363'O	4400
34	11° 21.563'S	76° 27.396'O	4391
35	11° 21.595'S	76° 27.429'O	4391
36	11° 21.676'S	76° 27.479'O	4385
37	11° 21.741'S	76° 27.513'O	4386
38	11° 21.774'S	76° 27.546'O	4385

**Tabla 2.** Coordenadas de los 38 puntos GPS.



En la Tabla 2 se hace un listado de las Coordenadas de los 38 puntos GPS y sus correspondientes alturas en ms.n.m registradas para la elección del BP Chunal (tomados con el instrumento de navegación portátil Garmin).



**Figura 3.2.** Zonas de los trabajos de campo, y puntos GPS tomados el 6 de diciembre del 2013, Escala aproximada 1/55000.

La Figura 3.2 muestra la toma de puntos GPS que se realizó en los dos bofedales, desde el bofedal menor hasta el BP Chunal, se registraron 38 puntos GPS (puntos amarillos). La Figura muestra también siete fotografías que fueron tomadas para observar las características de las zonas, estas siete fotos están designadas desde la A a la G. la imagen **I**. Las fotografías A, B, C, D, E, fueron tomadas el 6 de diciembre del 2013, las fotografías F y G fueron tomadas el 1 de julio del 2014.

## CAPÍTULO 4

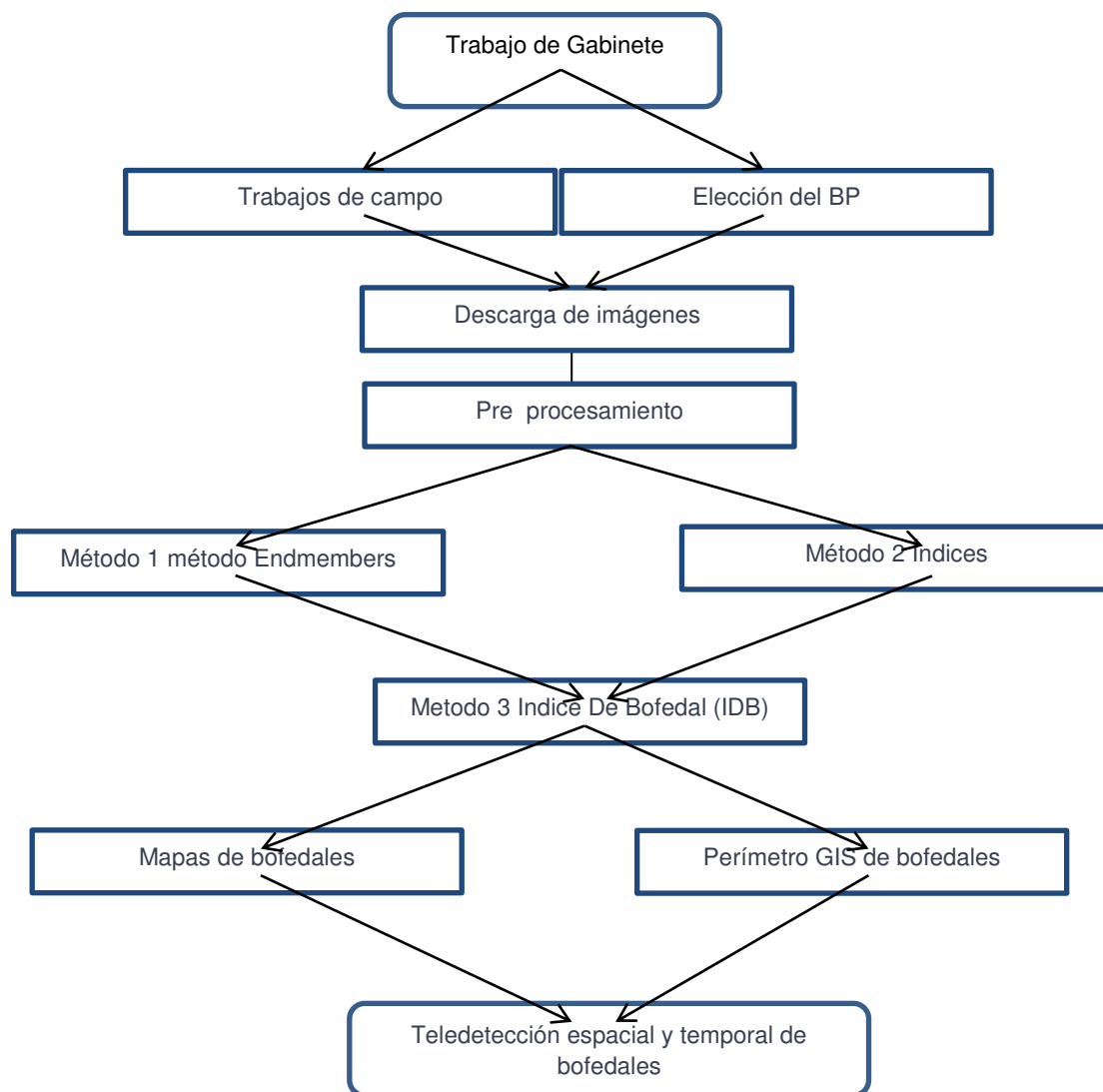
### METODOLOGIA

Luego de realizar los trabajos de gabinete y de campo se procedió a descargar las imágenes Landsat para realizar el pre procesamiento. La Metodología final denominada Metodología 3 Índice de bofedal (IDB), es el resultado de dos Metodologías previas, que por separado también detectan los bofedales. La primera Metodología previa, denominada Metodología 1 método emdmembers, se realizó usando la técnica LSU para la cual fue necesario calcular el endmember bofedal. La segunda Metodología previa, denominada metodología 2 método Índices, empleó principalmente los Índices IDV, IDA, IDI (Tabla 1 del Capítulo 2).

Finalmente agrupando estas dos Metodologías previas (Metodología 1 método emdmembers, Metodología 2 método Índices,) se generó la Metodología final: Metodología 3 método IDB, esta metodología sólo utiliza tres bandas ( $\rho$ NIR,  $\rho$  GREEN,  $\rho$ SWIR). Figura 4.1

Posteriormente se realizaron perímetro GIS del IDV, IDA y IDI, de bofedales desde el año 1986 al 2014. Estos datos se encuentran en el Anexo digital Archivo

La Metodología tiene el siguiente esquema general:



**Figura 4.1.** Esquema general de la Metodología empleada para la teledetección espacial y temporal de bofedales.

La Figura 4.1 muestra un esquema general de la Metodología empleada para la teledetección espacial y temporal de bofedales, en ella se aprecia que existe dos Metodologías previas a la Metodología final: método 3 índice de bofedale.

#### **4.1 TRABAJO DE CAMPO Y ELECCION DEL BP**

Inicialmente se realizó un trabajo de gabinete para la selección de bofedales

#### **4.2. DESCARGA DE LAS IMÁGENES**

La descarga de imágenes se realizó desde el portal de la United States Geological Survey, USGS, Global Visualization Viewer (Glovis) (15 enero 2015) que es una herramienta de búsqueda en línea rápida y fácil para los datos de satélite seleccionados. Desde la página de visualización del navegador, <http://glovis.usgs.gov/>, (fecha de acceso 15 enero 2015), el usuario puede navegar, ya sea para ver las ubicaciones de escena adyacentes o seleccionar una nueva área de interés.

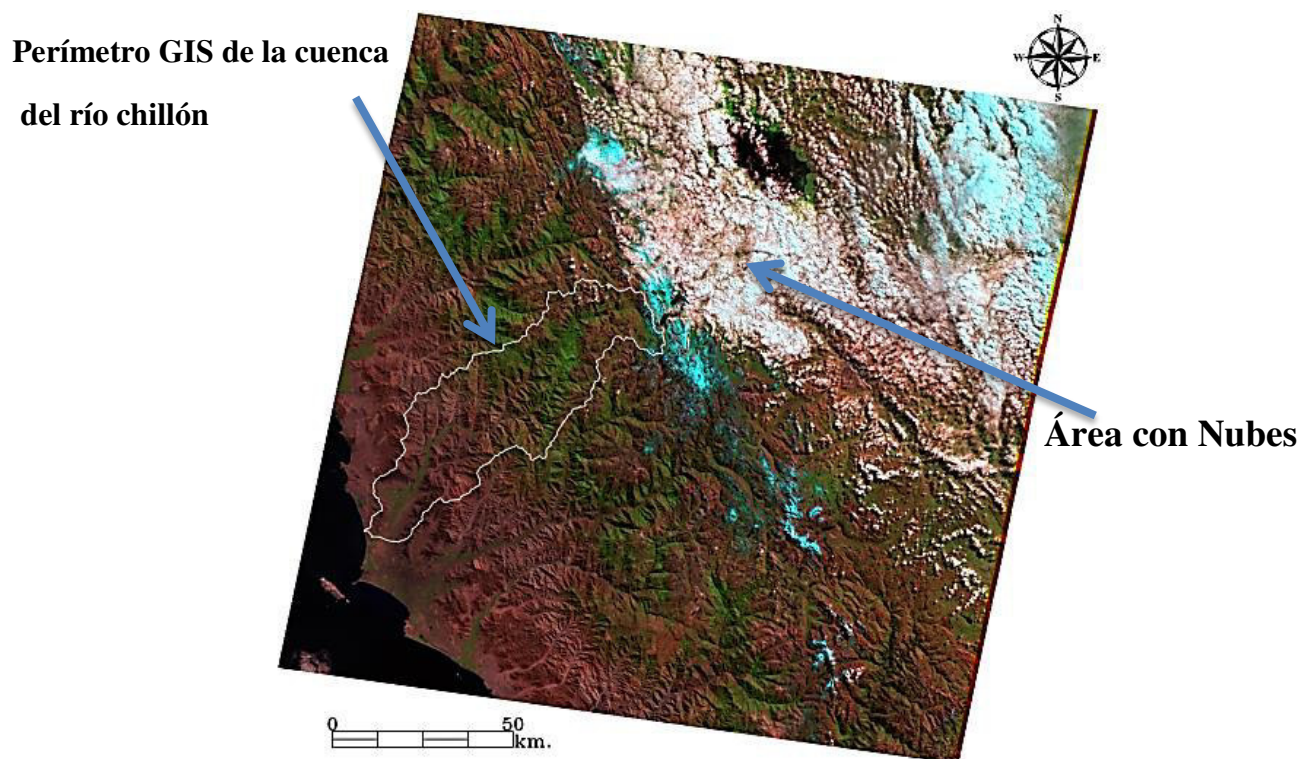
Se eligieron las imágenes con “*Path*” 7, “*Row*” 78. En la Tabla 3 se muestra el listado de las imágenes que se descargó. Para propósitos de ejemplo tenemos el pre procesamiento de: LC80070682014186LGN00, N° 29 de la Tabla 3

Nº	Año	Fecha	Sensor	Codigo	Hora UTC 05	Nubosidad (%)	C.G
1	1986	5/05/86	TM	LT50070681986125XXX02	14:35:53	0	L1T
2	1987	5/24/87	TM	LT50070681987144XXX02	14:35:00	20	L1T
3	1988	6/11/88	TM	LT50070681988163CUB00	14:41:30	20	L1T
4	1989	6/14/89	TM	LT50070681989165CUB00	14:38:51	18	L1T
5	1990	5/16/90	TM	LT50070681990136CUB00	14:31:13	36	L1T
6	1991	6/20/91	TM	LT50070681991171CUB00	14:33:54	17	L1T
7	1992	7/24/92	TM	LT50070681992206CUB00	14:33:49	21	L1T
8	1993	6/25/93	TM	LT50070681993176CUB00	14:33:24	19	L1T
9	1994	7/14/94	TM	LT50070681994195CUB00	14:29:07	16	L1T
10	1995	5/14/95	TM	LT50070681995134CUB00	14:18:36	0	L1T
11	1996	5/16/96	TM	LT50070681996137CUB00	14:22:06	19	L1T
12	1997	6/20/97	TM	LT50070681997171AAA03	14:40:33	0	L1T
13	1998	7/09/98	TM	LT50070681998190AAA01	14:49:08	10	L1T
14	1999	6/26/99	TM	LT50070681999177CPE05	14:48:48	26	L1T
15	2000	5/27/00	TM	LT50070682000148XXX02	14:46:50	0	L1T
16	2001	6/15/01	TM	LT50070682001166CUB01	14:51:17	15	L1T
17	2002	6/26/02	ETM+	LE70070682002177EDC01	14:59:22	15	L1T
18	2003	7/07/03	TM	LT50070682003188CUB00	14:47:14	23	L1T
19	2004	5/06/04	TM	LT50070682004127CUB02	14:51:14	19	L1T
20	2005	5/05/25	TM	LT50070682005145COA00	14:58:20	15	L1T
21	2006	5/12/06	TM	LT50070682006132CUB00	15:03:01	9	L1T
22	2007	6/16/07	TM	LT50070682007167CUB00	15:04:58	17	L1T
23	2008	5/17/08	TM	LT50070682008138CUB00	14:59:24	21	L1T
24	2009	5/04/09	TM	LT50070682009124COA01	14:58:30	15	L1T
25	2010	4/21/10	TM	LT50070682010111CUB00	15:01:48	15	L1T
26	2011	7/29/11	TM	LT50070682011210CPE00	14:59:56	16	L1T
27	2012	6/21/12	ETM+	LE70070682012173CUB00	15:05:24	19	L1T
28	2013	4/29/13	OLI	LC80070682013119LGN01	15:12:43	6	L1T
29	2014	7/05/14	OLI	LC80070682014186LGN00	15:10:46	13	L1T
30	2015	7/08/15	OLI	LC80070682015189LGN00	15:10:26	13	L1T

**Tabla 3.** Listado de las imágenes Landsat. Fuente: Los datos se descargó desde, <http://glovis.usgs.gov/> Fecha de acceso: 15/12/2015



En la Tabla 3 se muestra un listado de las 30 imágenes Landsat que se han descargado para el desarrollo de este trabajo, la Tabla 3 también muestra las características de las imágenes, tales como, año, fecha, el sensor de captó la imagen, el código de la imágenes, el % de nubosidad y la correlación geométrica (C.G) que es el Productos de nivel 1 Terrain (L1T) Se seleccionó las imágenes de la escena que presentaban el menor Porcentaje de nubes, además como las dimensiones de las escenas Landsat son de 180km x 180km y las dimensiones de la cuenca del río Chillón son aproximadamente de 85 km x 80 km, se eligió imágenes en la cual las nubes estuvieran en menor porcentaje y fuera de la cuenca en estudio Figura 4.2



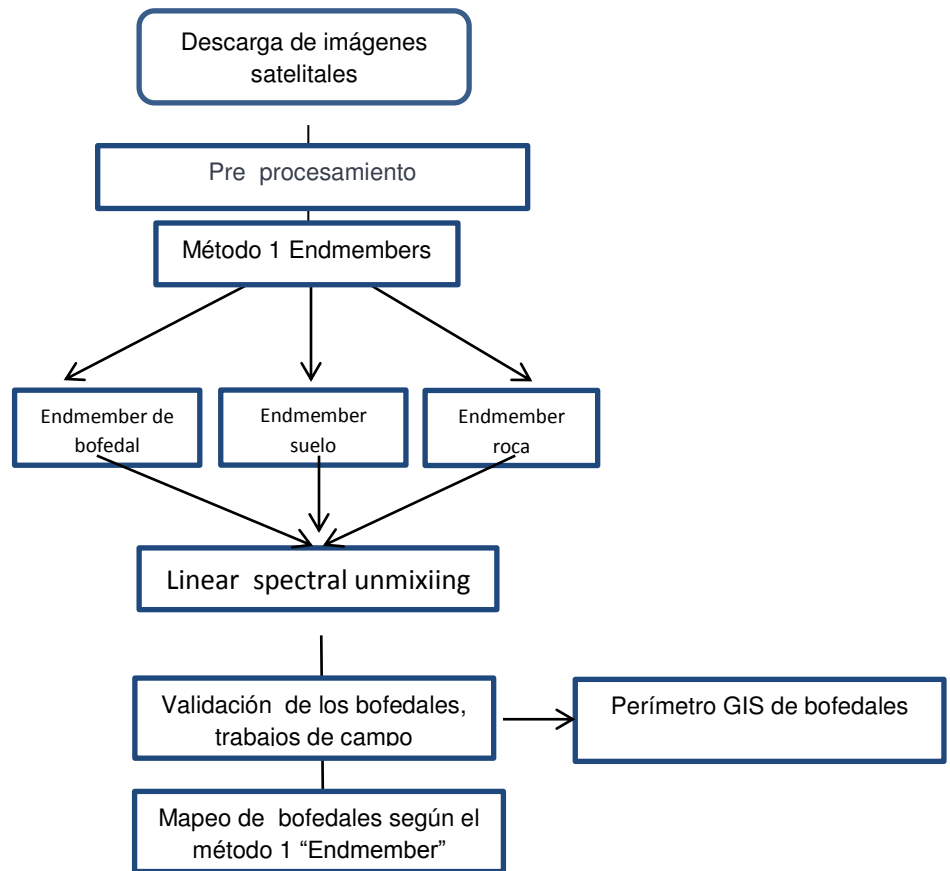
**Figura 4.2.** Escena de la imagen Landsat 5 de la cuenca del río Chillón, perímetro GIS de color blanco delimita la cuenca del río Chillón

La Figura 4.2 muestra una imagen Landsat 5 (escena de la imagen Landsat 5) que tiene los siguientes características para su selección: “*path*” 7, “*row*” 68. La imagen es de la fecha 26/6/99, en ella se aprecia que existe una nubosidad del 26%, (zona gris) pero esta nubosidad se encuentra fuera de la cuenca del río Chillón, contorno GIS color blanco.



#### **4.3 METODOLOGIA 1 PARA LA TELEDETECCION DE BOFEDALES: METODO “ENDMEMBER”**

El método 1, de identificación, se inició en base de la firma espectral de los bofedales que fue registrada por los sensores satélites Landsat (Figura 5.12). Para obtener la firma espectral del bofedales se tomaron coordenadas de uno de los puntos GPS del BP “Chunal” registrados en los trabajos campo (Figura 5.13), así se obtuvo el “endmember” (EM) bofedal, de la misma forma se obtuvo los EM: roca y suelo (Figura 5.14). Luego se realizó una clasificación de la cobertura superficial usando la técnica LSU mediante el software ENVI. En esta clasificación de la cobertura se utilizó los tres EMs: bofedal, roca y suelo. Una vez terminada la clasificación, el software ENVI generó un mapa de la cuenca del río Chillón en la que en cada pixel se encontraba una fracción de abundancia de cada EM, siendo el más importante, para el estudio, la fracción del EM bofedal. Luego se obtuvo los rangos de la fracción EM que zonificaba los bofedales, con esto se generó un perímetro GIS que limita el área de bofedales (Anexo digital Archivo) el cual clasifiqué a todas las superficies pertenecientes a la clase bofedal, esto se realizó para cada fecha de la adquisición de las imágenes, este perímetro GIS fue filtrado a tamaños mayores a 1 ha. Un esquema Metodología 1 se muestra en el Figura 4.3.



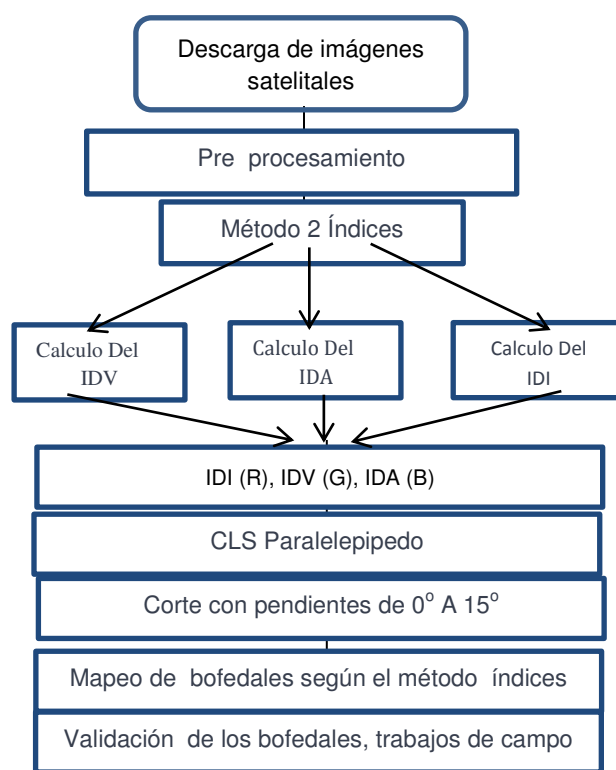
**Figura. 4.3** Método 1

En la Figura. 4.3 se muestra el diagrama simplificado del Metodología 1, Método Endmembers, se observa que fue necesario la elección de los “endmembers”: bofedal, suelo y roca.

#### **4.4 METODOLOGIA 2 PARA LA TELEDETECCION DE BOFEDALES: METODO INDICES**

La segunda Metodología para detectar bofedales se inició con la generación de IDV, IDA, IDI, para luego visualizar estos índices en Red,Green,Blue de la siguiente forma; Red (IDI), Green (IDV), Blue (IDA), el análisis RGB ha sido empleado en teledteccion, Utke et al., 1993. Este tipo de visualización, en RGB, permitió que las áreas de los bofedales queden claramente zonificados y se realizó una CLS más adecuada. Para ver cuál era el tipo de CLS que mejor zonificaba los bofedales se probó con varios clasificadores del programa ENVI,

Se hizo un factor mostró que el mejor clasificación para los bofedales fue el Paralelepipedo que clasificó la clase bofedal de CRCH. Generando así un mapa de clasificación en la cual estaba presente la clase bofedales. Posteriormente se generó un mapa de pendiente adecuada, ver Anexo digital Archivo, este valor se calculó del relieve del BP. Este mapa de pendientes se utilizó para cortar el mapa de clasificación y así obtener un mapa de clasificación con pendientes de 0 a 15 °, en este mapa se aprecia mucho mejor la zonificación de los bofedales, corroborando los que se visualizaron en los trabajo de campo. Luego se hizo IDV, IDA, IDI pero esta de bofedales. Un esquema de Metodología 2 se muestra en el Figura 4.4



**Figura. 4.4.** Método 2

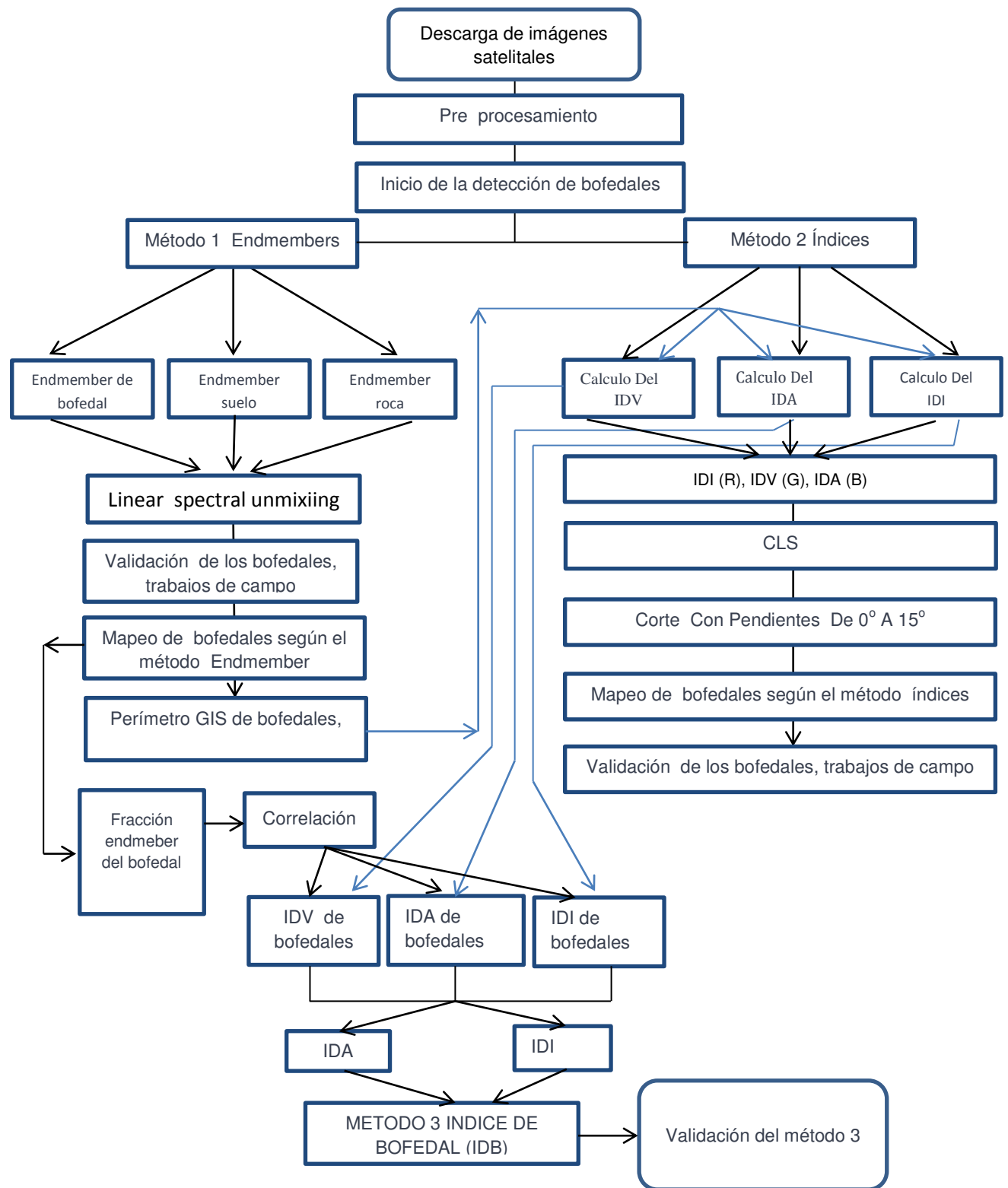
**Figura. 4.4.** Diagrama del Metodología 2 empelada para el mapeo de bofedales, en el diagrama se observa que fueron necesarios cálculos los índices: IDV, IDA y IDI, que fueron visualizados en RGB, para después realizar una CLS Paralelepipedo, y finalmente se usó el contorno GIS de pendiente de 0 a 15 °

Basados en las propiedades espectrales EM, y en las propiedades biofísicas de los bofedales (IDV, IDA, IDI), se ha propuesto dos Metodologías para el mapeo de bofedales, cada una

tiene características propias, en el Método 1 se obtiene un mapa de bofedales, pero sin información de las características de los bofedales como son las condiciones de vegetación, humedad, condiciones que si las muestra la Metodología 2 a través del IDV, IDA y IDI, pero para el método 2 son necesarias también una CLS y la utilización de un contorno GIS de pendientes. Se desea obtener una Metodología que pueda mapear a los bofedales de una manera más directa y sencilla, para esto en base a las dos Metodologías anteriores se realizó el Método 3, Índice de Bofedal (IDB)

#### **4.5 METODOLOGIA 3, FINAL, PARA LA TELEDETECCION DE BOFEDALES: MÉTODO IDB**

Se calcularon el IDV, IDA y IDI para los perímetros GIS de bofedales generado por el Método 1 (“endmember”). Se correlacionó el valor de la fracción de EM bofedal del Método 1 con los valores de IDV, IDA, IDI para la zona con bofedales. De esta manera fue posible percibir cuales son los índices principales para la detección de bofedales. Posteriormente, se relacionaron los índices principales obteniendo matemáticamente una nueva relación de bandas a la se denominó Índice de Bofedal (IDB), ecuación 5.3. Como parte del mapeo de bofedales, con el IDB se ubicó los bofedales para cada año del periodo en análisis, obteniéndose así el contorno GIS de bofedales por cada año, estos contornos fueron filtrados para aquellos valores que tengan como tamaño mínimo una ha. Posteriormente, este último contorno GIS fue utilizado para calcular el promedio de distribución espacial de los índices de los bofedales. Con el contorno GIS de bofedales también se calculó la cantidad de hectáreas de bofedales, con este dato se pudo aproximar un valor estimado del Potencial Volumen de Almacenamiento de Agua (PVAA) de toda la cuenca, esto gracias al valor del contenido volumétrico de Agua (VWC) que se obtuvo en los trabajo de campo, sección 5.1.1. Además se realizó mapas de doble eje en la vertical entre las áreas de bofedales y los IDV, IDA, IDI promedios, también se relacionó los resultados anteriores con el ENSO y con los Índices C y E. Finalmente se replicó el procedimiento para los años comprendidos desde 1986 al 2015 para observar la dinámica de las áreas de los bofedales. Un esquema detallado que une las dos primeras Metodologías y generan el método IDB se muestra en la Figura 4.5



**Figura. 4.5** Método 3, Método IDB

La Figura. 4.5 Diagrama de la Metodología final: Metodología 3, Método IDB, en ella se observa que la Metodología es una agrupación de las dos metodologías previas.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1 CARACTERIZACIÓN DEL BP

Mediante los trabajos de campo realizados, se procedió a la caracterización de la zona de estudio, que fue realizada en dos etapas. Durante la primera etapa se midieron parámetros físicos. Además tomamos cinco muestras de los suelos del BP a una profundidad de 15 cm. La segunda etapa fue desarrollada en los laboratorios de la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM, en ella se calculó el valor de la concentración de pH de las muestras de suelos del BP, también estas muestras fueron utilizadas para realizar un análisis general sobre la mineralogía presente en los bofedales mediante la difracción de Rayos X.

##### 5.1.1 PROPIEDADES FÍSICA

El primer trabajo de campo ejecutado 6 de diciembre del 2013, fue CRCH por el programa Agua-andes, en el marco del desarrollo de esta tesis (<http://www.agua-andes.com/> Fecha de acceso: 29/09/2015), en el lugar denominado bofedal menor, en ella se tomaron medida de algunos parámetros físico químicos. Figura 5.1. A. El dispositivo que se utilizó fue el equipo de medición instantánea ProCheck ( <http://www.cocopeatfertilizer.com/equipos-de-control>, fecha de acceso 12/9/2016). Figura 5.1. B.



**Figura 5.1.** A) Lugares de toma de muestra para los valores de T, CE, y el VWC, B) Detalles.

La figura 5.1 muestra el procedimiento para la toma de muestras de suelos del bofedal, se trazó una línea imaginaria y en ella se tomaron puntos (en rojo). En cada punto ya una profundidad de 15 cm se midió algunos parámetros fisicoquímicos de los suelos del bofedal: temperatura, T, conductividad eléctrica, EC, por sus siglas en inglés; contenido volumétrico de agua, VWC, por sus siglas en inglés. Tabla 4

Para ver más detalles del VWC, Anexo C



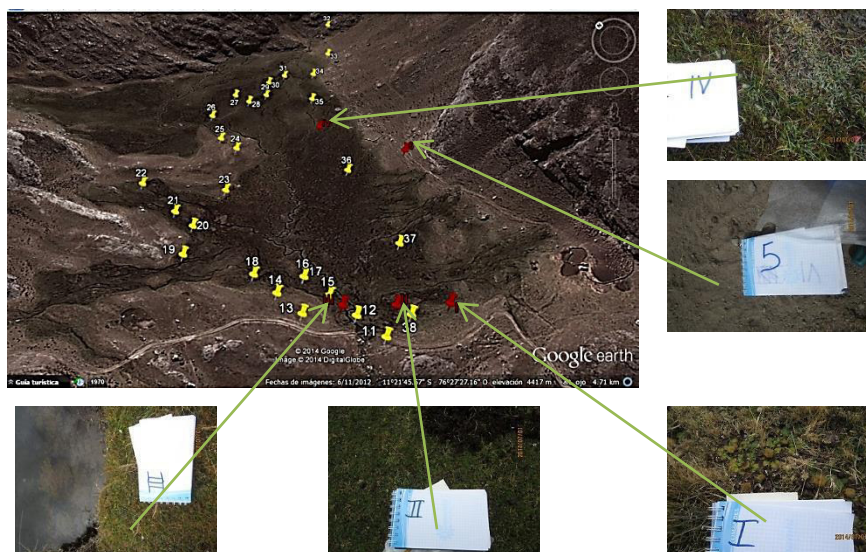
Lat UTM Datum WGS84 [m]	Long UTM Datum WGS84 [m]		Altura [ms.n.m ] Datum WGS84	VWC [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	T [°C]	EC [dS/m]
350521	8742859		4233	0.45	15.3	0.2
340488	8742880		4237	0.56	13.9	0.3
340463	8742898		4244	0.41	12.0	0.2
340468	8742930		4242	0.39	12.5	0.2
340497	8742929		4242	0.57	11.8	0.3
340523	8742911		4242	0.52	13.2	0.3
340549	8742899		4239	0.52	13.3	0.1
340555	8742927		4239	0.49	12.9	0.3
340533	8742938		4238	0.53	12.4	0.3
340547	8742971		4241	0.47	12.2	0.2
340566	8742959		4225	0.34	12.3	0.2
340584	8742990		4249	0.34	12.8	0.2
340558	8743010		4248	0.29	15.5	0.1
340562	8743095		4257	0.55	11.5	0.3
340526	8743025		4246	0.46	9.0	0.3
340511	8742987		4245	0.50	8.6	0.3
VALORES PROMEDIO				0.46	12.4	0.2

**Tabla 4.** Mediciones de los parámetros fisicoquímicos

La Tabla 4 muestra los resultados de las análisis fisicoquímicos los suelos del bofedal que presentó para el 6 de diciembre del para más detalles ver la Tabla C.1 del Anexo C),

### 5.1.2 MUESTRAS DE SUELO DEL BP

Los trabajos de campo que se realizaron tuvieron varias finalidades, una de ellas fue la de recolectar suelos y ver sus parámetros fisicoquímicas; en el segundo trabajo de campo el día 1 de julio del 2014, se recolectaron 5 muestras de suelos a 15 cm de profundidad Figura 5.2, cuatro de ellas estaban dentro del bofedal ubicados en lugares diferentes y la quinta muestra estaba fuera, Tabla 5.



**Figura 5.2.** Suelos recolectados del BP Chunal

La Figura 5.2 muestra los puntos GPS donde fueron tomadas muestras del suelo del bofedal. Se eligieron 5 punto en distintas partes (marcador rojo), 4 dentro del bofedal y la quinta fuera, en estos puntos se tomaros muestras de suelo.

Muestra	Coordenadas, UTM WGS84 [m] Zona 18 S Lat	Coordenadas, UTM WGS84 [m] Zona 18 S Log	Atura msnm.	Ubicación respecto al bofedal
M I	340811	8743811	4405	Muestra en borde del bofedal
M II	340791	8743503	4402	Muestra en la salida del bofedal
M III	340767	8743534	4402	Muestra en la salida de agua del bofedal
M IV	340961	8743758	4406	Muestra en la parte central del bofedal
M 5	340971	8743642	4416	Muestra fuera del bofedal a 130 m de M IV

**Tabla 5.** Localización, muestreo, fecha: 1de julio de 2014

La Tabla 5 toma de muestras y sus coordenadas en el BP tomadas con el instrumento de navegación portátil Garmin, también muestra la altura a que estan situadas las muestras, y la ubicación de la muestra respecto al bofedal: muestra al borde del bofedal, a la salida del bofedal en el medio del bofedal o fuera del bofedal.

### 5.1.3 CALCULO DEL pH

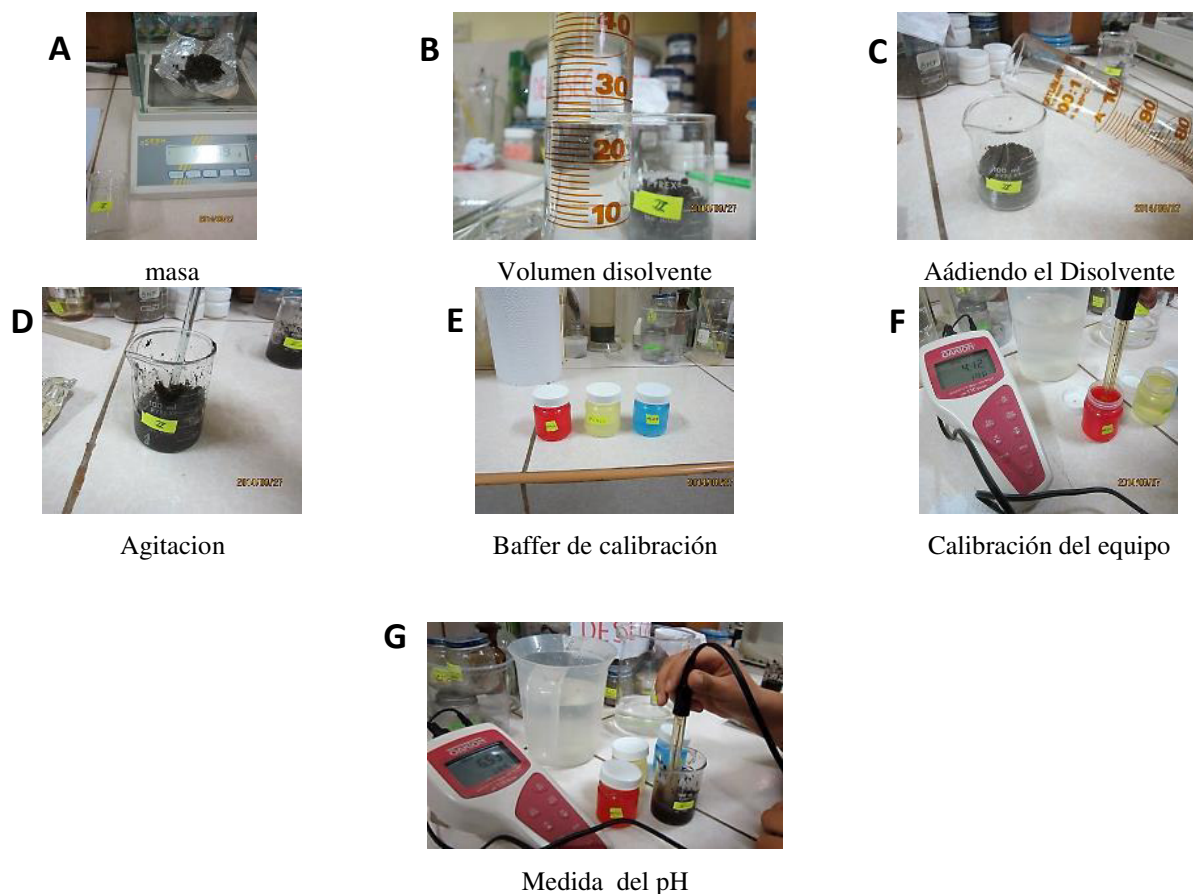
En Tabla 6. Vemos los valores del pH. La Figura 5.3 hace un resumen de la medida. Anexo C.2

Muestra	pH	Temperatura [°C]	Condición
M I	4.7	19.8	FUERTEMENTE ACIDA
M II	5.86	19.8	ACIDA
M III	6.51	19.8	LIGERAMENTE ACIDA
M IV	6.35	19.8	ACIDA
M 5	5.72	19.8	ACIDA

**Tabla 6.** pH del muestras.

.

La Tabla 6 arroja los resultados que obtuvieron de las medidas del pH de las cinco muestras. Se observa que en general las muestras son ácidas, variando desde ligeramente ácida, para la muestra M III, hasta fuertemente ácida, para la muestra M I.

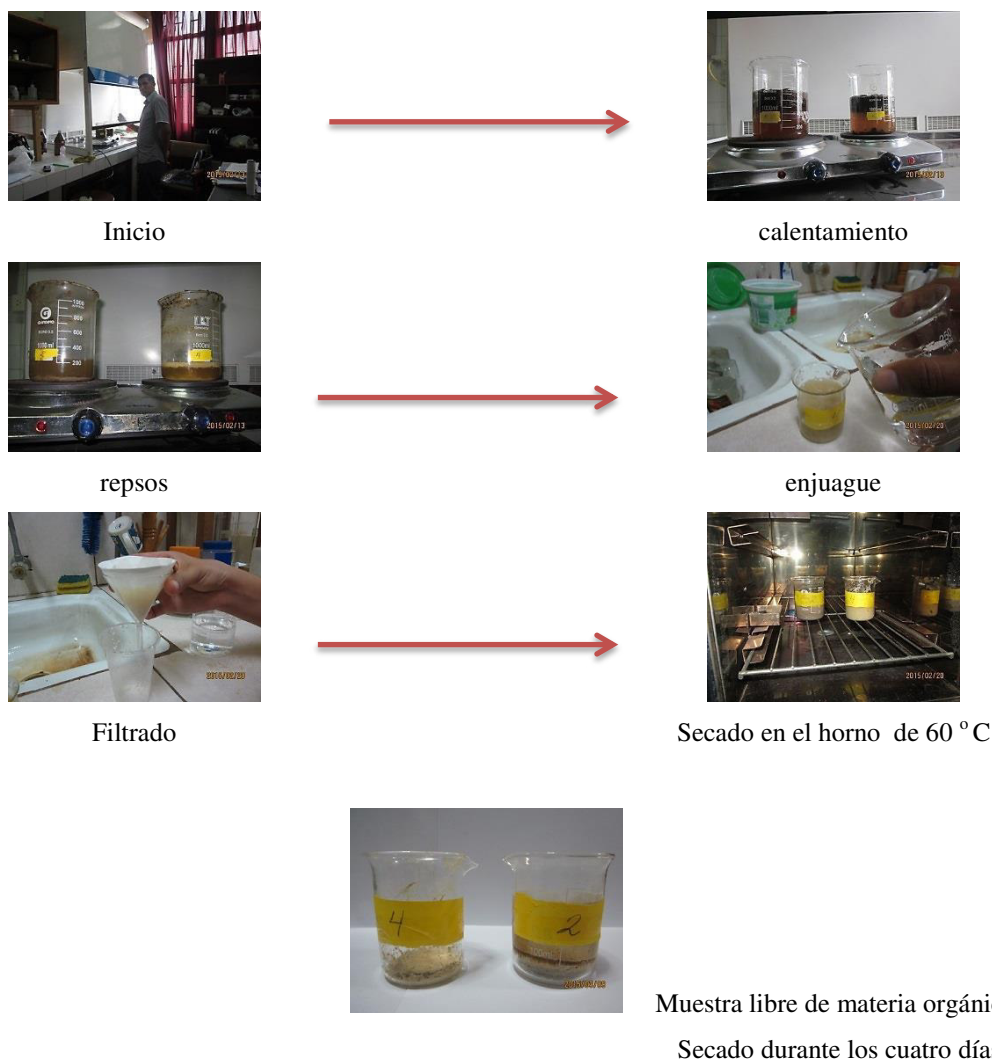


**Figura 5.3.** pH de las muestras, fecha 27 /8/2014

La Figura 5.3 observamos la medida del pH, las fotografías fueron tomadas en el alboratorio de suelos de la Faculta de Ciencias Físicas de la UNMSM el 27 de agosto del 2014. Algunos valores similares de ph de este tipo de suelos esta en: La Fuente, A. A. et al., 1988, Sotomayor et al, 1990.

#### **5.1.4. SEPARACION DE SUSTANCIAS ORGANICAS.**

Separación de sustancia orgánica. Figura 5.4. El procedimiento se describe en el Anexo C.3



**Figura 5.4.** Separación de sustancias orgánicas. Fotografías de fecha 23 /2/2015

La Figura 5.4 separación de sustancia orgánica, las fotografías fueron tomadas en la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM el 23 de febrero del 2015 este procedimiento se realizó a todas las muestras que contenían materia orgánica. Los pormenores del procedimiento de cálculo del pH se encuentran en el Anexo C.2

### 5.1.5 PREPARACION PARA LA XRD

Para determinar la mineralogía presente en el BP “Chunal” se realizó un análisis de difracción de rayos X (XRD) en la Facultad de ciencias físicas de la UNMSM Preparación. Figura 5.5 Ver los detalles en el Anexo C.4



Inicio



Molienda



Muestra en polvo



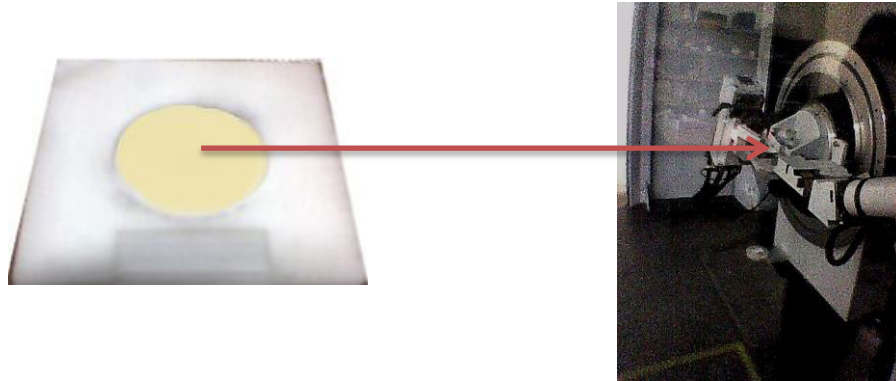
Acesorio de medida

**Figura 5.5 . Acondicionamiento de los suelos para XRD.**

La Figura 5.5 muestra el procedimiento para el analisis de XRD. Se tomo la muestra y se utilizo un mortero de Agata para pulverizar para la XRD.

### 5.1.6 EJECUCIÓN XRD

Ejecución de la técnica de XRD Figura 5.6

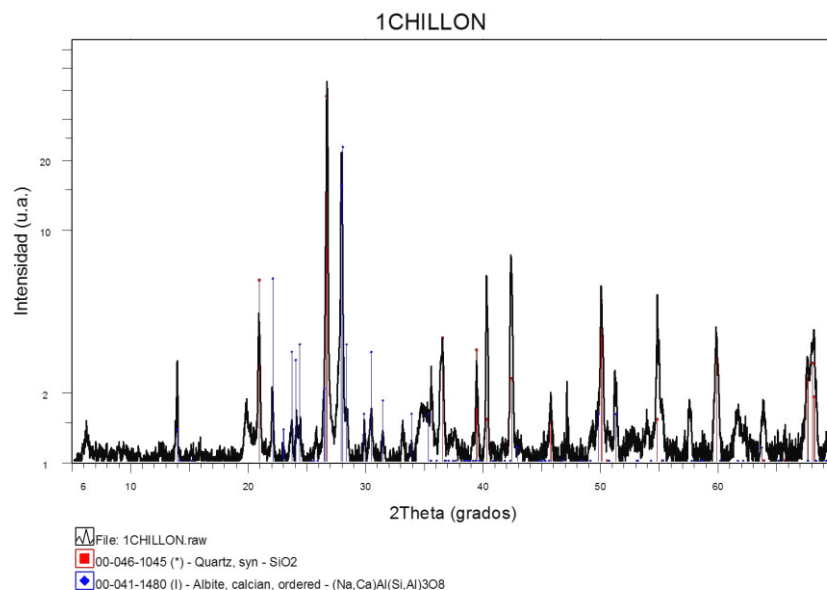


**Figura 5.6.** Maquina XRD..

En la Figura 5.6 se aprecia a la muestra de suelo del bofedal en el porta muestras (imagen izquierda), además se observa el equipo de XRD, y la muestra es colocada en el equipo para su análisis (imagen derecha).

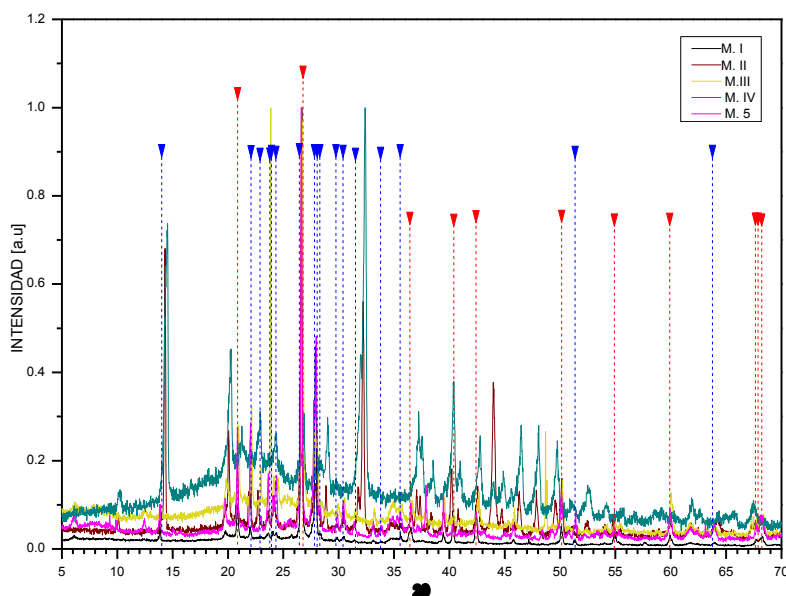
#### **5.1.7 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE XRD**

La Figura 5.7 presenta el resultado de XRD para la muestra I (Figura 5.2). Las intensidades muestran que el suelo del bofedal presenta principalmente: Albite, línea azul con patrón de referencia PD2 41-1484, Quartz línea roja con patrón de referencia PD2 46-1045. En la Figura 5.8 las muestras juntas. Los datos para XRD se encuentran en el Anexo digital Archivo.



**Figura 5.7** XRD de la muestra I

En la figura 5.7 se observa la XRD de la muestra 1, se aprecia los picos característicos del Cuarzo, PD2 46-1045, líneas rojas; Albite con PD2 41-1484, líneas azules.



**Figura 5.8** XRD de las 5 muestras.

Figura 5.8 XRD en conjunto. En el eje vertical, Y, número de cuentas normalizada a uno, sin unidades; en el eje horizontal, X, el ángulo  $2\theta$  en grados sexagesimales. De la gráfica se aprecia los picos característicos de Cuarzo (PD2 046-1045) líneas rojas, y los picos característicos del Albite con (PD2 041-1484) líneas azules. El PD2 046-1045 y el PD2 041-1484 se encuentran en el Anexo digital Archivo



## 5.2 ANÁLISIS A PARTIR DE LOS 3800 msnm.

Las investigaciones de la superficie terrestre requieren el análisis de la topografía, altitud, pendiente (*Topographic Science Working Group, 1988; Bolstad y Stowe, 1994*). menudo un DEM es principal fuente de datos para derivar las variables del terreno en relación con composición de la vegetación (*Franklin, 1995; Miller and Franklin, 2002; Moore et al., 1991*). Como parte de la investigación se generó un mapa DEM (Figuras 5.9 y 5.10). Los datos fueron descargados de los archivos del ASTER GDEM de 30 m de resolución espacial. ASTER GDEM se basa datos obtenidos de elevación de una década (2000-2009), centrándose principalmente en 2000 presenta un “bias” aproximado de 5m, (*Hedegaard et al., 2012*).

### 5.2.1 DEM CRCH

Se generó un mapa DEM de toda la cuenca del río Chillón, Figura 5.9, se observa los diferentes niveles de elevación que van desde los 0 a 5273 ms.n.m. Como se ha mencionado anteriormente, los bofedales son ecosistema de puna, que se encuentran en alturas superiores a 3800 msnm, debido a esta característica se han analizado los lugares de la cuenca de río Chillón partir de esta altura, para tal fin se generó un DEM de la cuenca con elevaciones a partir de los 3800 msnm, denominándola a esta zona cabecera de cuenca del río Chillón, Figura 5.10. Los datos del DEM están en el Anexo digital Archivo.

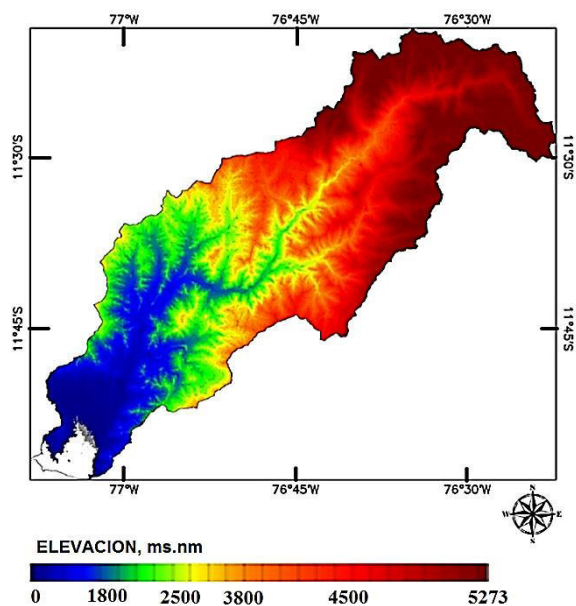


Figura 5.9. DEM, CRCH.

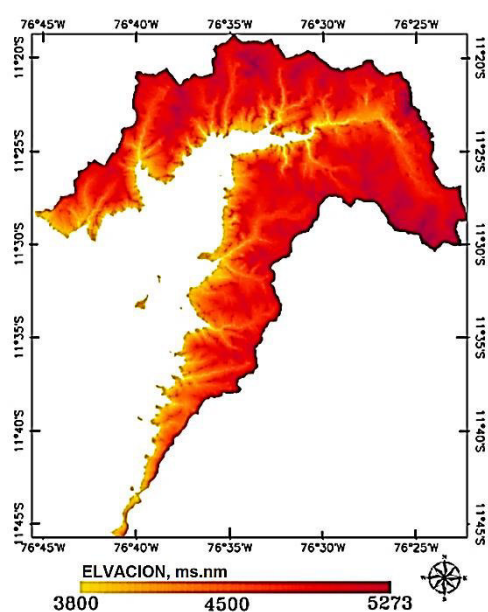


Figura 5.10. DEM, parte alta CRCH

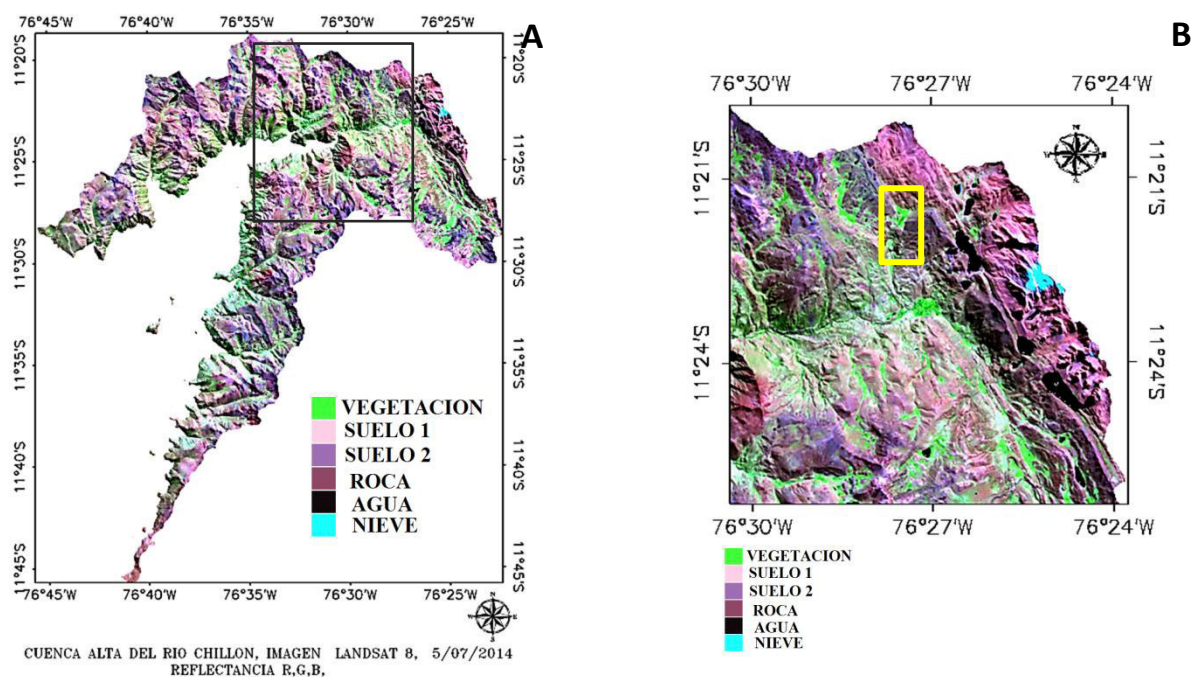
Las Figuras 5.9 y 5.10 muestran dos mapas de DEM de la cuenca total del río Chillón y otro mapa DEM de la cabecera de la cuenca del río chillon, para alturas superiores a los 3800 ms.nm, ya que, como se ha mencionado anteriormente, es a partir de esta elevación en la que se encuentra los bofedales.

### 5.3. MÉTODOS DE MAPEO DE BOFEDALES

A continuación se procederá a describir las metodologías

#### 5.3.1 MÉTODO “ENDMEMBER”

Una vez realizado el pre procesamiento y realizada corrección atmosférica de las imágenes Landsat con el modelo FLAASH. Se visualizó, una sola imagen, en RGB la cabecera de cuenca del rio Chillón mediante las bandas SWIR 2, NIR, RED respectivamente, Figura 5.11. De esta forma se identificó a los bofedales reconocidos en los trabajos de campo. Luego se seleccionó los EM que se utilizó para aplicar el método de clasificación LSU, para el EM bofedal se tomó uno de los punto GPS registrado en el trabajo de campo. Este punto se encuentra al interior del BP, finalmente se procedió a seleccionar los EM roca y suelo.

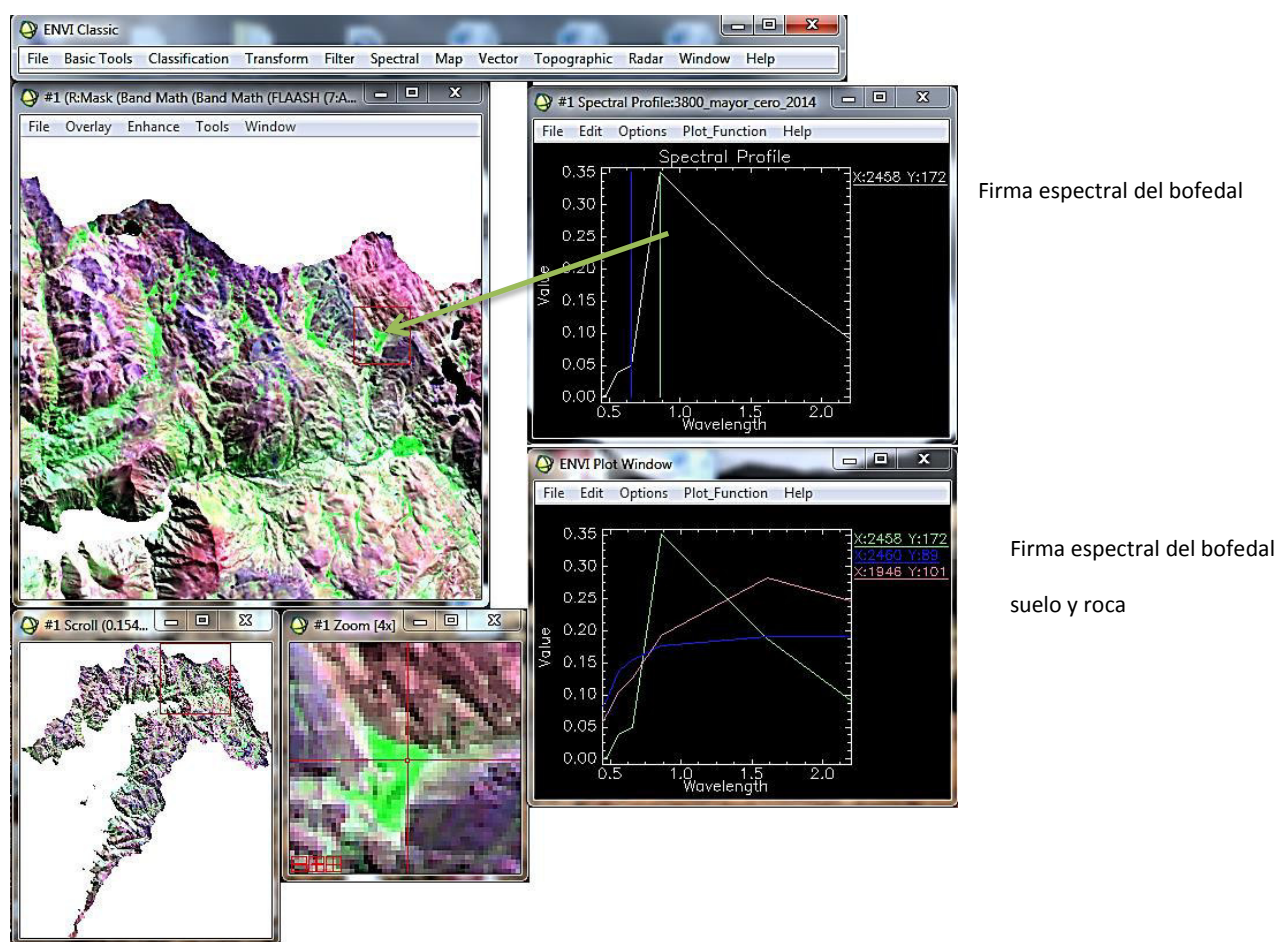


**Figura 5.11.** A) Parte alta CRCH, SWIR 2 ( R), NIR(G), RED(B). B) Zona cercana a trabajos (campo) y BP Chunal, rectángulo amarillo.

La Figura 5.11 imagen A muestra la visualización, en RGB la cabecera de cuenca del río chillón mediante las bandas SWIR 2, NIR, RED respectivamente. También se observa un corte de las zonas aledañas al BP (rectángulo amarillo) en la imagen B

### 5.3.1.2 ELECCIÓN DE LOS “ENDMEMBER”

Para la elección de las firmas espectrales de los “endmembers” se usó el software ENVI, en ella se seleccionaron puntos validados en los trabajos de campo. Estos puntos se encontraban en áreas con objetos homogéneos y de firma espectral próxima, así se obtuvo, “endmember” bofedal, “endmember” roca, “endmember” suelo, Figura 5.12. Una vez seleccionado los “endmember” se exporta estos espectros a un archivo ASCII, este archivo será utilizado para la aplicación de la clasificación usando el método LSU. (Fuente: Elaboración propia)

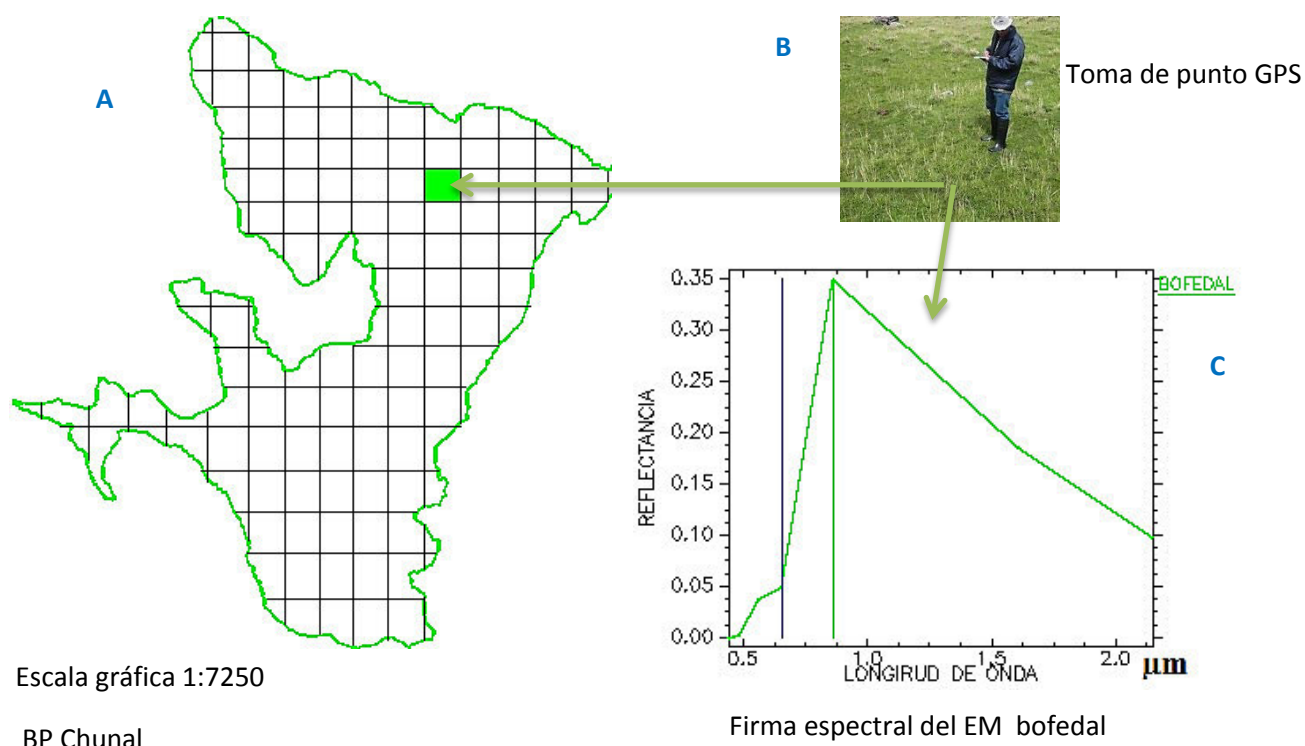


**Figura 5.12.** Elección de las firmas espectrales que fueron utilizadas como endmembers en el método de clasificación LSU.

La Figura 5.12 muestra el empleo del software ENVI, en ella se seleccionaron las firmas espectrales de puntos dentro del bofedal (“endmember” bofedal), y puntos fuera del bofedal (“endmember” roca, “endmember” suelo)

### 5.3.1.3 ELECCIÓN DEL “ENDMEMBER” BOFEDAL

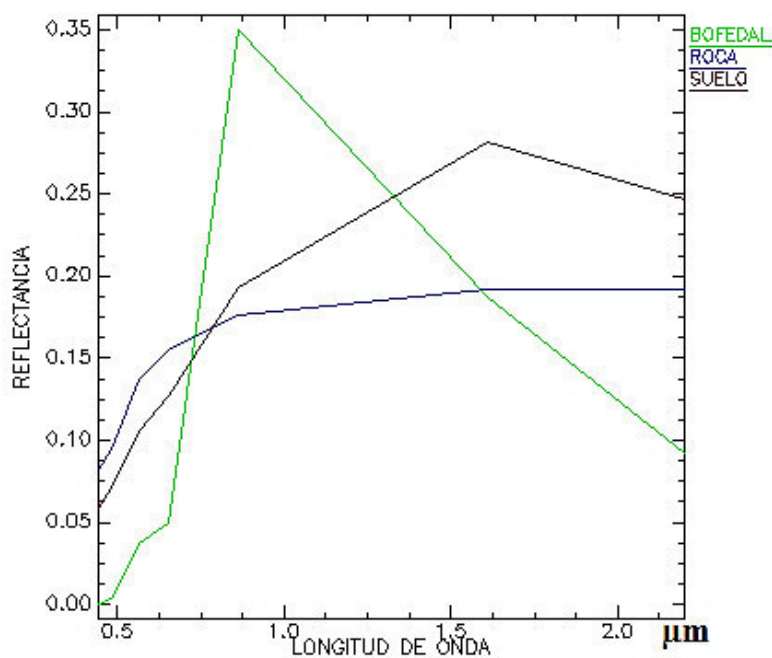
Como se ha mencionado en la sección 5.3.1.2, se eligió un punto dentro del bofedal pitloto Chunal, EM bofedal. Este punto registra una firma espectral característica, Figura 5.13. Además este punto corresponde a uno que se encuentra en la zona en cuyos alrededores tienen características similares, principalmente vegetación homogénea que cubría la mayor parte de la superficie del BP.



**Figura 5.13.** A) BP Chunal. (B) Toma de punto GPS y C) Firma espectral homogénea correspondiente, EM bofedal.

La Figura 5.13 muestra la elección del pixel dentro del bofedal pitloto Chunal, aquí se tomó un punto GPS (el punto debe ser lo más representativo al bofedal, como por ejemplo presentar una vegetación uniforme y característica del bofedal). Luego se registró en el programa ENVI la firma espectral característica de este punto del bofedal, que corresponde al “endmember bofedal”

De la misma manera, se eligió los EM roca y suelo. En la Figura 5.14 se muestran simultáneamente estas firmas espectrales y se aprecia las diferencias de las firma espectrales de estos EM.



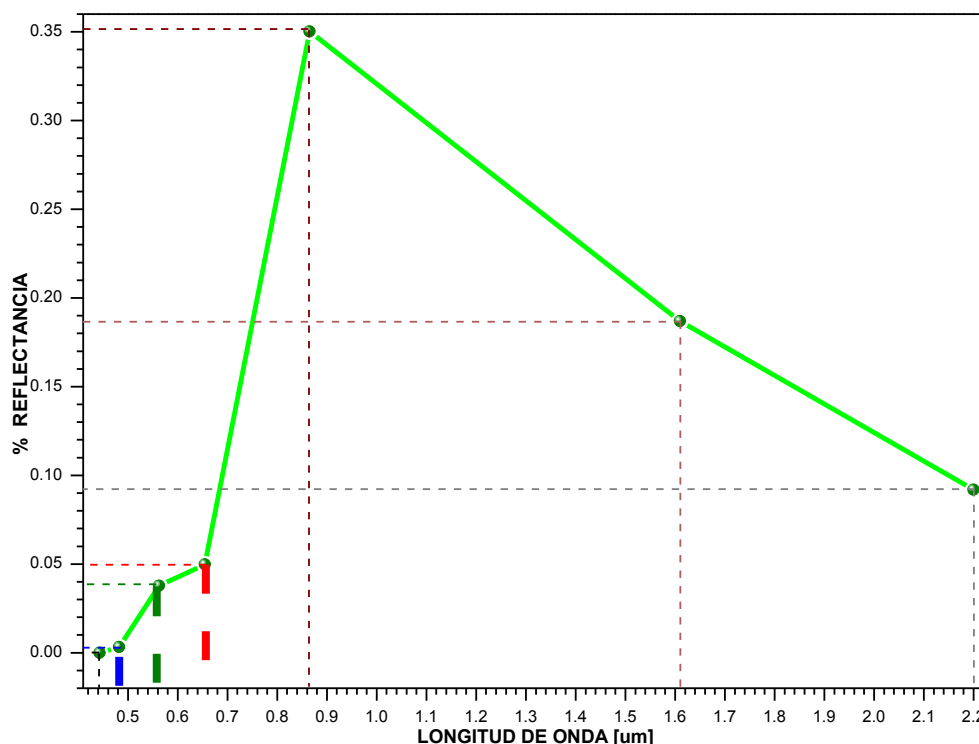
**Figura 5.14** Tres “endmember”, bofedal, roca y suelo.

En la figura 5.14 se observa las tres firmas espectrales correspondientes a los “endmember” bofedal(del BP), en color verde; “endmember” roca en color azul y “endmember” suel en color marron. Estas firmas espectrales fueron tomadas del programa ENVI.

#### **5.3.1.4 CARACTERISTICAS DEL “ENDMEMBER” BOFEDAL**

El endmember bofedal elegido del BP, presenta una firma espectral obtenida de la imagen del sensor OLI del satélite Landsat, Figura 5.15





**Figura 5.15** Firma espectral del “Endmember” bofedal.

La Figura 5.15 muestra la firma espectral tomada del uno de los puntos del BP Chunal. La fecha de la toma del punto fue 6 de diciembre del 2013. Localizada en las coordenadas Lat: 11° 21.539'S Lon: 76° 27.447'O. La firma espectral tiene las siguientes características: la forma es propia de la vegetación verde, además para la banda AZUL presenta un porcentaje de reflectancia muy pequeño de 0.0032, para la banda VERDE presenta un porcentaje de reflectancia también pequeño de 0.0377, para la banda ROJA presenta un ligero aumento en el porcentaje de reflectancia siendo este 0.0498, para la banda NIR presenta su máximo porcentaje de reflectancia llegando a 0.3502, para la banda SWIR 1 el porcentaje de reflectancia decrece llegando a 0.1869, y para la banda SWIR 2 sigue decayendo hasta el valor de 0.0919. Fuente: Elaboración propia

De la gráfica 5.15 se puede interpretar, en este trabajo, que existe poca reflectancia o gran absorción de la energía en la región visible, AZUL, VERDE, ROJO, ya que, en esta región los pigmentos Clorofila a y b, caroteno y xantofila absorbe la energía para realizar el proceso de fotosíntesis. En la banda BLUE y la RED ocurre la absorción de la energía debido a la presencia de la clorofila a y b, mientras en la banda GREEN la absorción de la

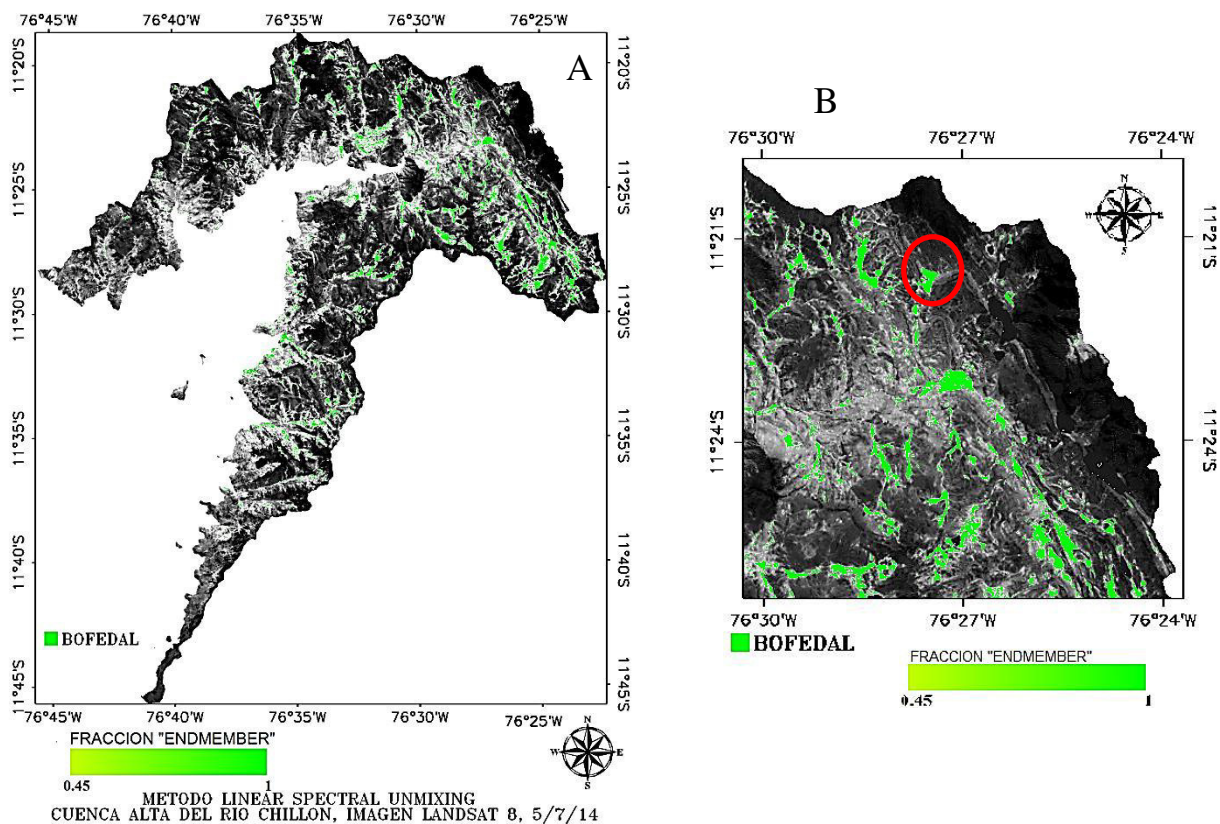
energía se debe a la presencia de los carotenos y Xantonfilas. Observamos entonces que la mayor parte de la energía que recibe el bofedal es utilizada para realizar el proceso de fotosíntesis. En la banda ROJA se observa que es más elevada que en una vegetación saludable, esto debido a la mezcla espectral y al alto contenido de agua en la superficie del bofedal.

También, se puede interpretar que en la región del NIR la reflectancia aumenta debido a la poca absorción en esta zona. Pero se observa que el porcentaje de reflexión no es muy alto esto se debe, probablemente, a otros factores que presenta la vegetación de en los bofedales, como por ejemplo, se sabe gracias a los trabajos de campo que la vegetación de los bofedales presentan hojas húmedas y compactas que puede absorben más energía y por lo tanto la el porcentaje de reflectancia en esta región no es tan alta.

En la zona del SWIR 1 y SWIR 2 se puede interpretar que la respuesta del contenido de agua en la vegetación es una gran absorción de la energía y el porcentaje de la reflectancia decae. Para el caso particular de los bofedales, se ha descrito que una de sus características principales es la constante humedad presente, dando como respuesta que, en los bofedales en esta zona, la absorción de energía sea considerable, producto del cual presenta bajos valores en el % de reflectancia.

#### **5.3.1.5 MAPEO DE CABECERA DE CRCH: MÉTODO “ENDMEMBER”**

Primeramente se realizó la Aplicación del Método LSU en el software ENVI, el procedimiento de la aplicación del LSU se encuentran en el Anexo D, Una vez generado el mapeo de la cuenca según el LSU se procedió a calcular los rangos fracción de los rangos mínimo y máximo del BP Chunal, posteriormente estos rangos fueron replicados a CRCH, Figura 5.16



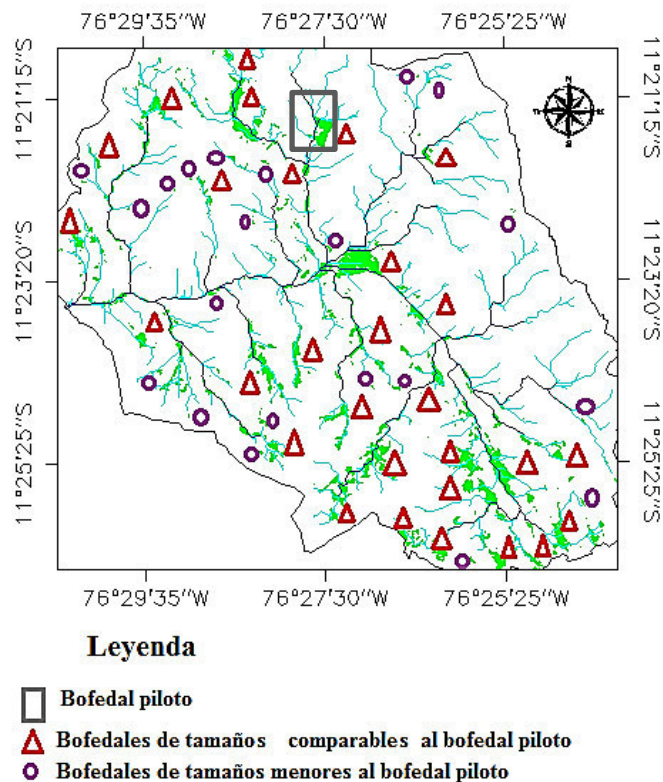
**Figura 5.16** A) Bofedales CRCH, método “endmember”. B) Zona cercana a los trabajos de campo. Imagen Landsat 8 de fecha 5/7/2014.

La Figura 5.16 muestra el mapa de bofedales generada con el método “endmember”, la parte, A, muestra el mapeo de bofedales para la cuenca a alturas superiores a los 3800 ms.n.m, la parte B muestra el mapeo de bofedales de zonas cercanas al BP (círculo rojo). Los valores de las fracciones “endmember” para los píxeles, que se encuentran al interior del BP, están en los siguiente rangos, para la fracción de “endmember” bofedal tiene un rango de 0.45 a 1, la fracciones “endmember” roca y la fracciones “endmember” suelo, en este mismo pixel, tienen el valor próximos a 0.

### 5.3.1.6 VALIDACIÓN DE LOS BOFEDAL, METODO “ENDMEMBER”

Se procedió a validar los bofedales mapeados por el LSU con los observados en los trabajos de campo. Desde el software ENVI se exporto los bofedales al Google Earth Pro, y desde allí se eligieron visualmente un total de 51 bofedales (Figura 5.17), de los cuales 50 resultaron aciertos es decir se tuvo un 98.% de aciertos. Figura 5.17

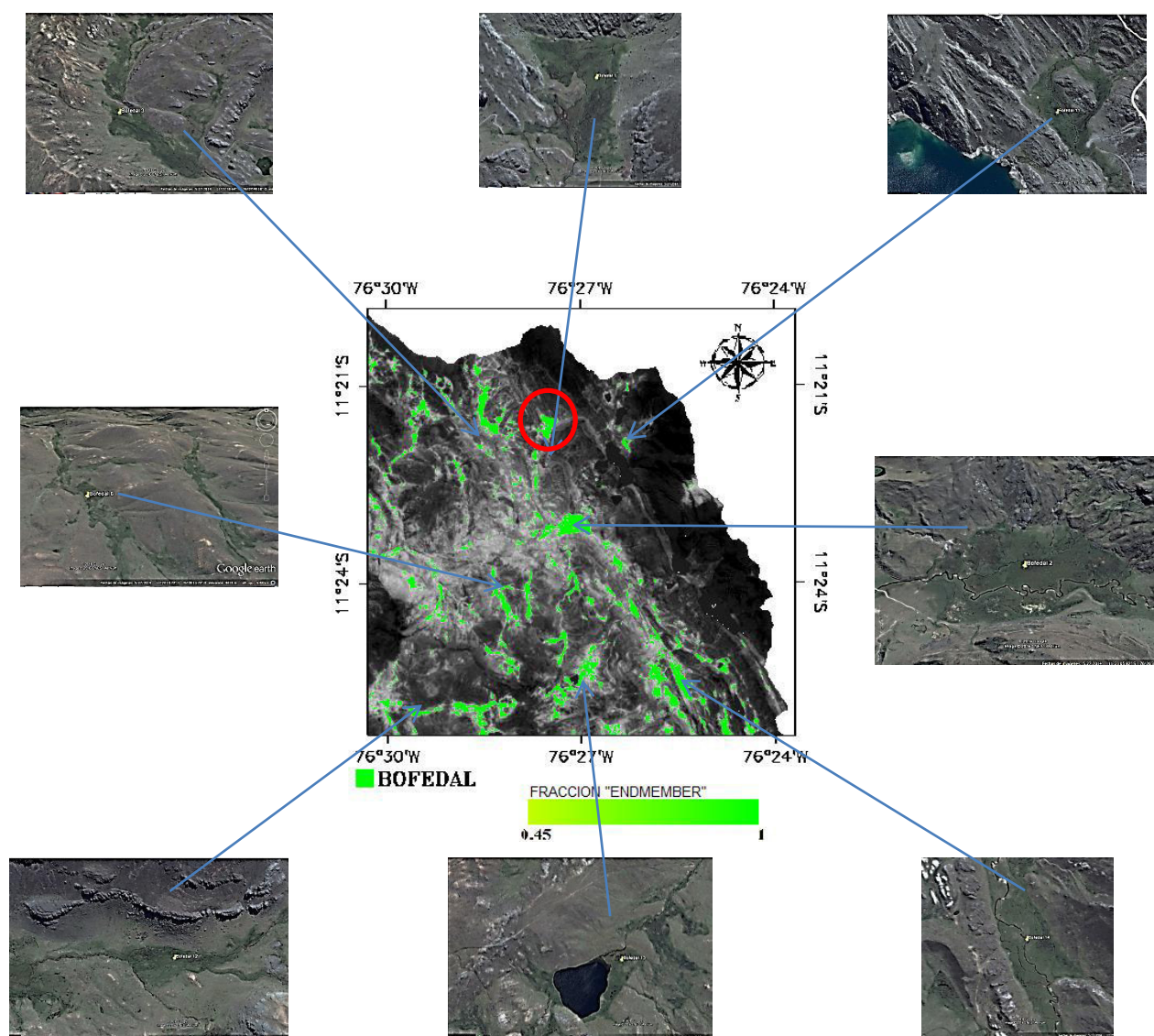




**Figura5.17.** Validación de bofedales mapeados.

La Figura5.17 muestra los puntos de Validación de bofedales mapeados, se observa los 51 puntos mapeados por el método “endmember”, la mayoría de estos fueron validados por los trabajos de campo y exportados al Google Earth Pro, mediante el software ENVI. En rectángulo gris el BP, en triángulo se observa bofedales comparables en tamaño al BP, en círculo lila se observa bofedales menores que el BP.

Debido a que sería poco visual presentar todas las imágenes de los bofedales validados en una sola figura y con el objetivo de mostrar que las clasificaciones corresponde a bofedales, Figura 5.18.

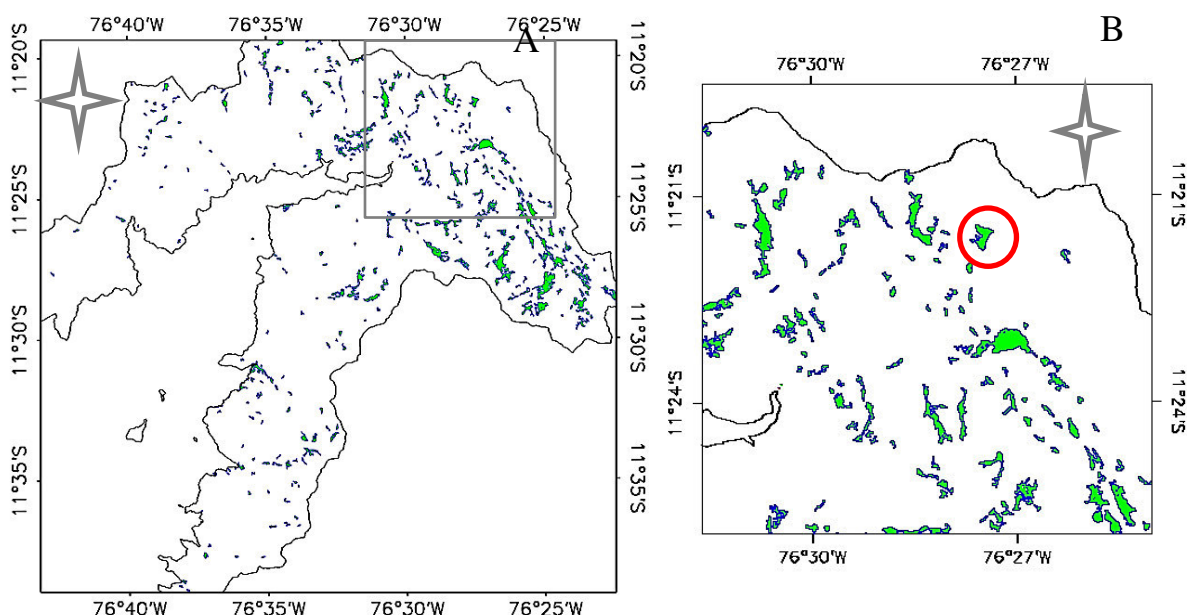


**Figura 5.18.** Bofedales mapeados por el método “endmember” y exportados al Google Earth Pro. En círculo rojo el BP Chunal.

La Figura 5.18 muestra imágenes la validación en datos de campode algunos puntos clasificados como bofedal, no se realizó una clasificación del tipo de vegetación. Se tomaron visualmente puntos en bofedales mostrados que se encuentran a unas distancias cercanas a la del BP (círculo rojo). Parte de las imágenes y coordenadas de los puntos tomados para la validación de la metodología se encuentran en el Anexo digital Archivo.

### 5.3.1.7 PERÍMETRO GIS DE BOFEDALES, METODO “ENDMEMBER”

Una vez generado el mapa CRCH, y eligiendo bofedales mayores a 1 ha, se procedió a generar la información geográfica de los perímetros a bofedales de parte alta de CRCH Figura 5.19 A. El archivo digital de los perímetros de los bofedales se encuentra en el Anexo digital Archivo. Además se realizó un acercamiento, rectángulo gris, para la zona cercana al BP, que representa el BP Chunal (círculo rojo) y los bofedales que están a su alrededor Figura 5.19 B.



**Figura 5.19** A) Perímetro GIS de bofedales, parte alta CRCH (mayores a 1 ha) para la fecha 5/7/2014. B) Perímetro GIS de bofedales de la zona cercana a los lugares de los trabajos de campo.

La Figura 5.19 A, muestra el perímetro GIS de bofedales para la cuenca alta del río Chillón, con altura superiores a los 3800 ms.n.m. La Figura 5.19 B muestra un acercamiento a los bofedales cercanos a la del BP. Una vez generado el archivo de perímetros de bofedales, se procedió al cálculo del área de los bofedales, de la siguiente forma, se multiplicó la cantidad de píxeles del archivo de bofedales por el área de cada píxel, para el caso del Landsat el área de cada píxel es de 900 m<sup>2</sup>.

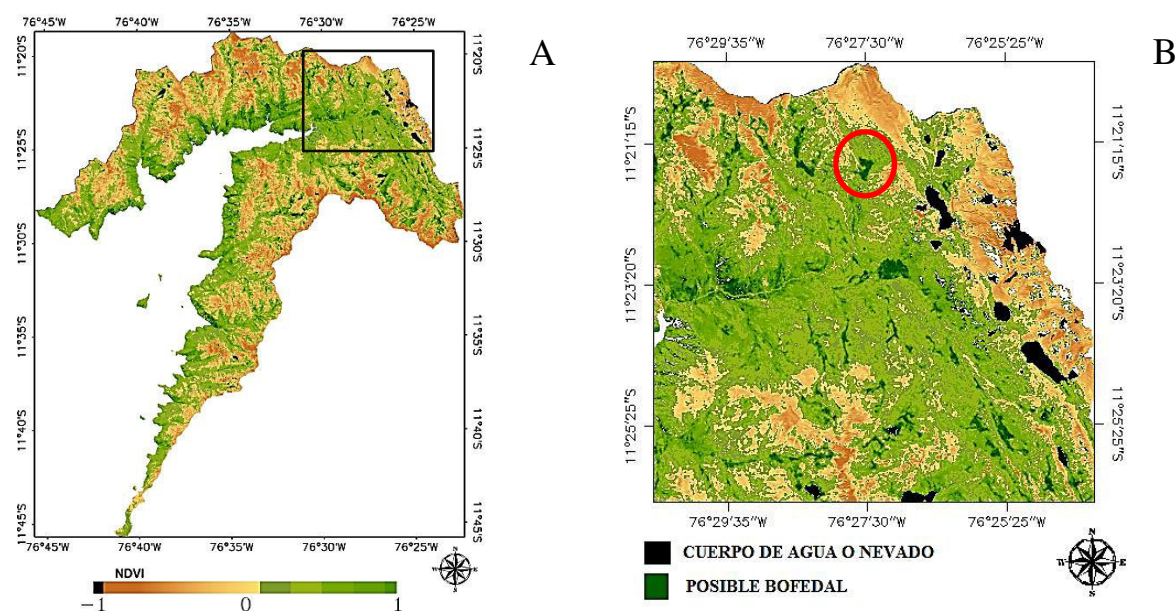
El cálculo de superficies de bofedales en CRCH para la fecha 5/7/2014, fue de 2162.79 ha. que es el 0.88% de CRCH

### 5.3.2 METDODO INDICES

La segunda metodología empleada para la teledetección de bofedales, emplea los índices biofísicos NDVI, NDWWI, NDII. Los datos de los índices se encuentran el Anexo digital Archivo.

#### 5.3.2.1 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL IDV

Realizado el preprocesamiento, y la corrección atmosférica se hizo el IDV en CRCH, el color verde oscuro los valores presentes dentro del bofedal. La generación de este mapa tuvo la finalidad de observar la calidad de vegetación presente en la cuenca del río Chillón y analizar si la vegetación presente dentro de los bofedales se distinguen a las demás áreas. De las observaciones realizadas en el trabajo campo se observa que el BP Chunal, queda zonificada en color verde oscuro que se encuentra en el rango 0.44 a 0.831, así, como también los bofedales que se encuentran en sus inmediaciones, que fueron corroboradas in situ, podemos apreciar que existen diferencias en el valor de IDV estas diferencias son las que zonifican los bofedales, Figura 5.20.



**Figura 5.20** A) IDV, CRCH; B) IDV trabajos de campo.

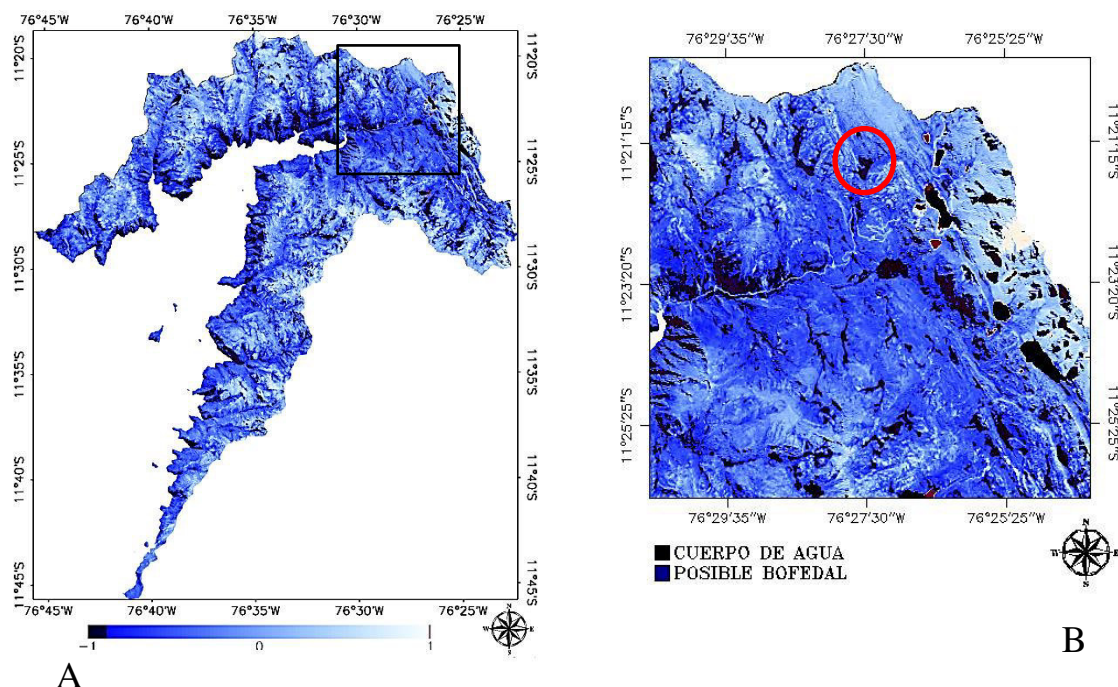
En la Figura 5.20 El IDV de la imagen OLI 1413 x 1660 píxeles., (fecha 5/07/2014) para CRCH, el IDV presenta rangos entre -1 a 1, pero debido a la pequeña extensión de la superficie de los bofedales, en relación al tamaño de la cabecera de cuenca, apenas se puede

distinguir algunas tonalidades de verde oscuro que probablemente corresponda a bofedales, para dar una mejor visualización y observar al BP Chunal se generó un mapa del IDV de los lugares cercanos al BP, la Figura 5.20 B de 400 x 400 píxeles. Los valores IDV del BP, color verde oscuro, está entre los 0.44 a 0.831, siendo un valor alto en comparación de las demás áreas del IDV de forma similar a este rango, existen más áreas, que según las observaciones del trabajo de campo son bofedales, además también se observa otras zonas dentro de este rango y tonalidad de verde que probablemente sean bofedales.

#### **5.3.2.2 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL IDA.**

Se generó el IDA de CRCH. El IDA se presenta en tonalidades de azul comprendido entre los rango de -1 a 1. En el mapa se muestra una paleta de colores que resalta en azul oscuro los valores del IDA, con rango -0.850 a -0.512, que zonifican a los bofedales. La generación de este mapa tuvo la finalidad de observar la humedad presente en la superficie de la cuenca del río Chillón y conocer los rangos del IDA que se encuentra dentro de los bofedales y diferenciarlos de las demás superficies. De las observaciones realizadas en los trabajos campo se muestra que en el mapa de IDA el BP Chunal, queda muy bien zonificado en color azul oscuro, así como también los bodefales que se encuentran en sus inmediaciones que fueron corroboradas in situ, Figura 5.21



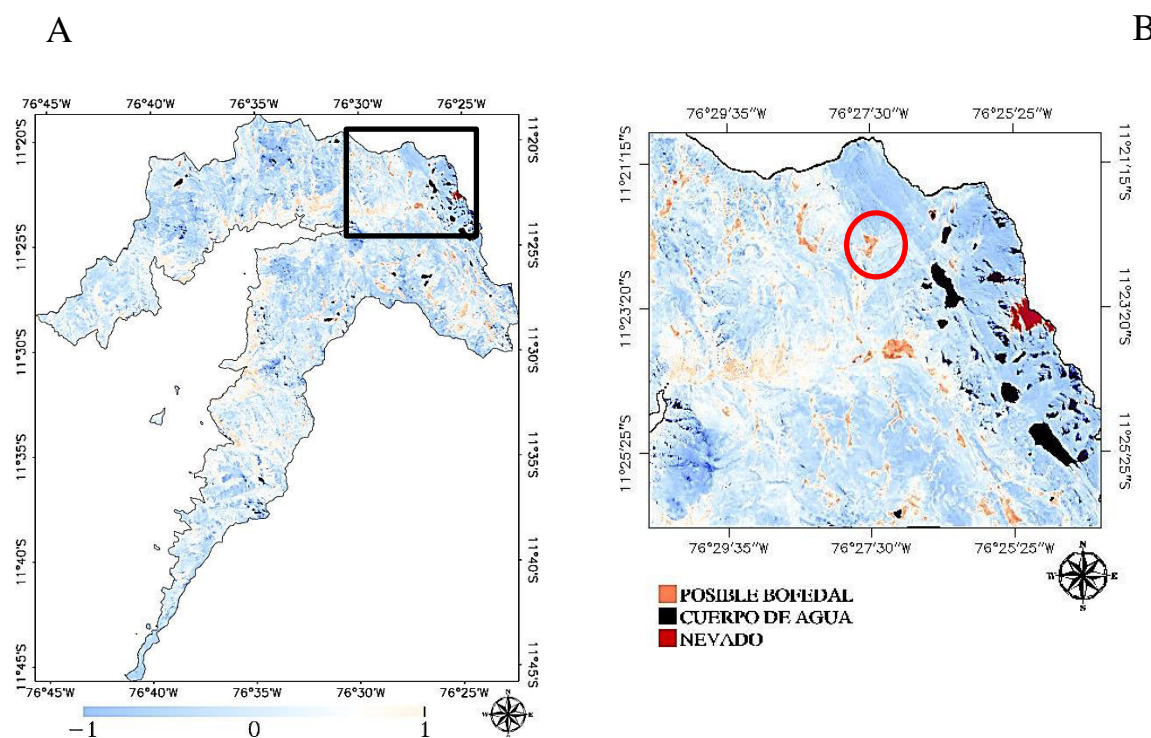


**Figura 5.21.** A) IDA, CRCH; B) IDA trabajos de campo

La Figura 5.21 El IDA de la imagen OLI 1413 x 1660 píxeles, (5/07/2014) de parte alta CRCH, el agua en zonas oscuras, debido a la extensión mínima de la superficie de los bofedales, en relación a la CRCH, es difícil distinguir claramente las zonas de color azul oscuro que probablemente sea un bofedal, para dar una mejor visualización y observar al BP Chunal se generó un mapa del IDA de los lugares cercanos al BP, Figura 5.21 B de 400 x 400 píxeles, aquí el IDA del BP Chunal, y la zona cercana al BP Chunal. El IDA del BP es de -0.850 el mínimo, y el máximo de -0.512, que se puede observar en color azul oscuro, de forma similar existen más áreas dentro de este rango, que según las observaciones en el trabajo de campo son bofedales, pero también existen otras zonas con las características anteriores que probablemente sean bofedales

### 5.3.2.3 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL IDI.

Así como para los índices IDV y IDA, se generó los mapas de distribución espacial del IDI en CRCH, en el mapa estan tonalidades celeste y marrón, estos comprendidos entre los rangos de -1 a 1. El índice muestra colores que resalta en marrón los valores del IDI que probablemente zonifiquen los bofedales. Se observa que existen diferencias entre los rangos del IDI que se encuentra dentro de los bofedales, comparamos los valores de los rangos de las demás superficies. En base a las observaciones realizadas en el trabajo campo apreciamos en el mapa de IDI del BP, Chunal, queda zonificada en color marrón, así como también los bofedales que se encuentran en sus inmediaciones que fueron corroboradas in situ, Figura 5.22



**Figura 5.22.** A) IDI,CRCH; B) IDI trabajos de campo.

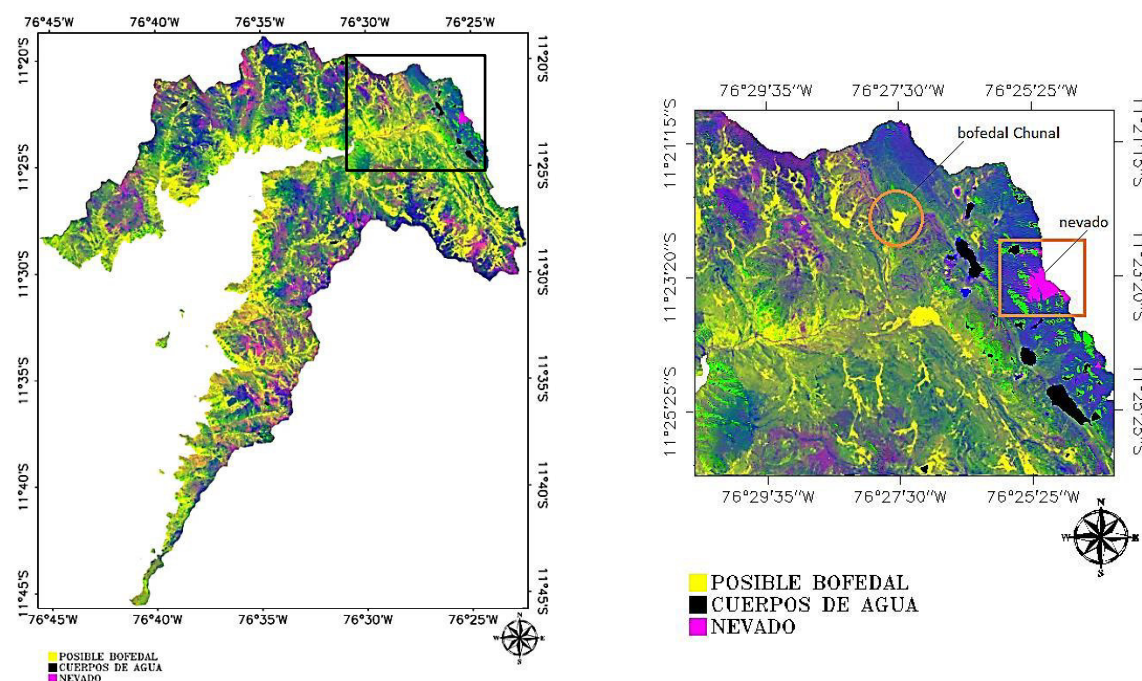
En la Figura 5.22 A se muestra el mapa de distribución espacial de IDI de la imagen OLI 1413 x 1660 píxeles, (para 5/07/2014) parte alta CRCH. Las pequeñas extensiones de los bofedales, comparada con el tamaño de la cabecera de cuenca, impide que se distinga claramente las zonas de color marrón que probablemente sea un bofedal, para obtener una mejor visualización se generó un mapa del IDI de los lugares cercanos al BP, Figura 5.22 B de 400 x 400 píxeles, aquí se observa que la distribución espacial de IDI de la zona del BP

“Chunal”, encerrada en círculo. La distribución espacial del IDI se presenta en tonalidades de colores verdes de rango entre -1 a 1. Los de IDI en BP son 0.002 para el mínimo y 0.470 como máximo.

Los del IDS de CRCH se muestran en el Anexo E

#### 5.3.2.4. VISUALIZACIÓN DE ÍNDICES IDV, IDA Y IDI EN Red, Green, Blue

Los índices IDV, IDA, IDI, individualmente zonifican ligeramente los bofedales. En esta seccion se procede a visualizar los índices en Red (R), Green (G) y Blue (B) ; R (IDI), G (IDV), B (IDA), Figura 5.23 A, Figura 5.23 B. B



**Figura 5.23.** A) Imagen RGB, CRCH. B) RGB, trabajos de campo (fecha 5/07/2014)

La figura 5.23 A, muestra una imagen en RGB de los índices IDI, IDV Y IDA en la parte alta CRCH. La figura 5.23 B, muestra una imagen en RGB de los índices IDI, IDV Y IDA de las zonas cercanas al BP, circulo naranja. el valor que zonifica los bofedales son los respectivos valores de sus índices individualmente.



### 5.3.2.5. CLS

Luego de obtener las zonas de los bofedales en R (IDI), G (IDV), B (IDA) se procedió a realizar una CLS de la escena teniendo como objetivo principal clasificar la clase bofedal, para tal fin se tomó como dato de entrenamiento el BP, Chunal, lugar que se conoce como bofedal por los trabajos de campo realizados a esta zona. Los algoritmos de clasificación fueron utilizados del Software ENVI.

### 5.3.2.6 FACTOR DE CONFIABILIDAD $f$

Para elegir el método de CLS se diseñó un factor de confiabilidad  $f$  que ayudo a elegir el tipo de CLS que muestre los mejores resultados para la zonificación de bofedales (ecuación 5.1), Fuente: Elaboración propia.

$$f = \frac{[A - (E1 + E2)]}{n + E2} \quad 5.1$$

$A$  = pixeles de la clase bofedal que se encuentran dentro del perímetro del bofedal

$E1$  = Número de pixeles dentro del perímetro del bofedal ,pero que no son de la clase bofedal

$E2$  = Número de pixeles que estan fuera del bofedal pero pertenecen a la clase bofedal

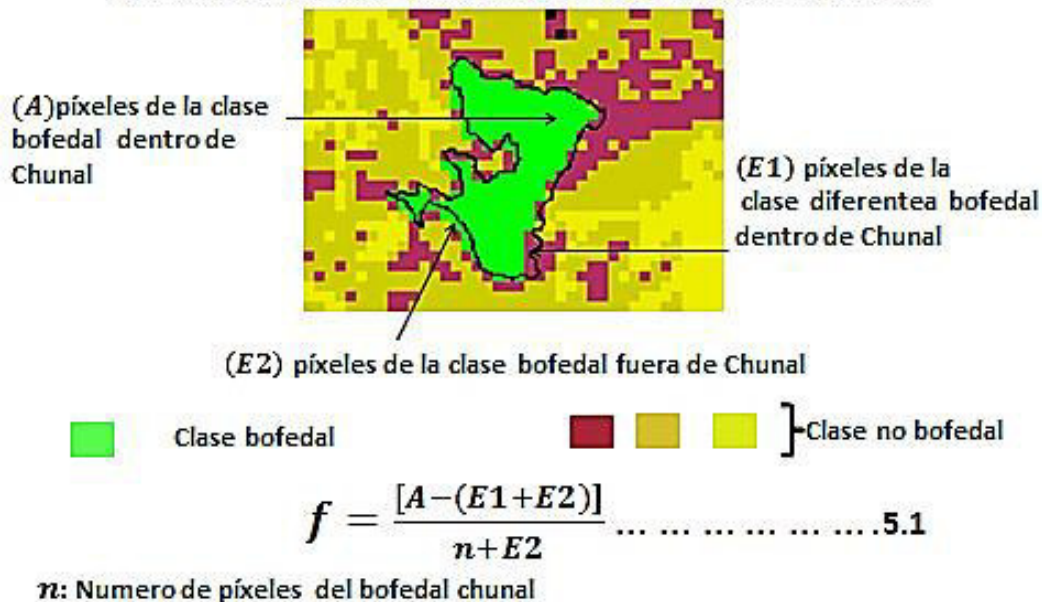
$n$  = Número total de pixeles del bofedal Chunal

Este factor se diseñó de la siguiente forma (Figura 5.24):

- 1). Se generó el perímetro GIS del BP
- 2). Cálculo de los pixeles de acierto,  $A$ , que corresponde a cantidad de pixeles de clase bofedal y se encuentran dentro del perímetro del bofedal.
- 3) Se calcularon los tipos de error,  $E1$  que corresponde al número de pixeles dentro del perímetro de bofedal pero que no son de la clase bofedal y  $E2$  que corresponde al número de pixeles que están fuera del perímetro de bofedal pero pertenecen a la clase bofedal.

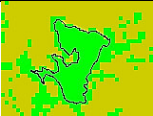

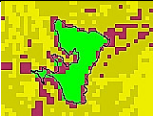

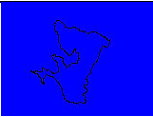

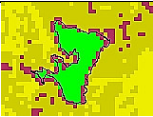



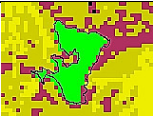

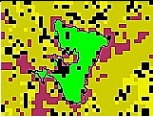

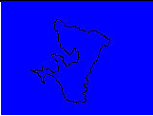

Luego se procedió según la Ecuación 5.1 para estimar el factor de clasificación. Los resultados del factor de confiabilidad se muestran en la Tabla 7.

## FACTOR PARA ELEGIR EL ALGORITMO DE CLASIFICACIÓN



**Figura 5.24.** Factor de confiabilidad para elegir el algoritmo clasificador.

La Figura 5.24 muestra un esquema grafico en la cual se describe cada elemento a utilizar en la formula  $f$ , como es el,  $A$ , que corresponde a cantidad de pixeles de clase bofedal y se encuentran dentro del perímetro bofedal,  $E1$  que corresponde a la cantidad de pixeles dentro del perímetro de bofedal pero que no son de la clase bofedal y el  $E2$  que corresponde a los pixeles que están fuera del perímetro del bofedal pero pertenecen a la clase bofedal.

<div>Detalles</div> <div>Clasificador</div>	Corte de la zona de BP	Bofedal Chunal	Detalles de la clasificacion del BP	<div>Facto</div> $f = \frac{[A - (E1 + E2)]}{n + E2}$
BINARY			#Píxeles A : 176 #Píxeles E1: 0 #Píxeles E2: 236	-0.15
MAHALONOVIS			#Píxeles A : 152 #Píxeles E1: 24 #Píxeles E2: 9	0.64
MAXI LIKEHOOL			#Píxeles A : 0 #Píxeles E1: 176 #Píxeles E2: 0	-1
MINI_DISTNCIA			#Píxeles A : 150 #Píxeles E1: 26 #Píxeles E2: 8	0.63
NEUTRAL NET			#Píxeles A : 0 #Píxeles E1: 176 #Píxeles E2: 0	-1
PARALLELEPIPED			#Píxeles A : 158 #Píxeles E1: 15 #Píxeles E2: 11	0.70
SPECTRAL ANGEL			#Píxeles A : 145 #Píxeles E1: 31 #Píxeles E2: 8	0.58
SPECTR INFO. DIV			#Píxeles A : 0 #Píxeles E1: 176 #Píxeles E2: 0	-1

**Tabla 7** Resultados del factor de confiabilidad para elegir el tipo de CLS  
Donde **n** = Numero de píxeles totales del BP Chunal. Para el BP Chunal, n es 176.

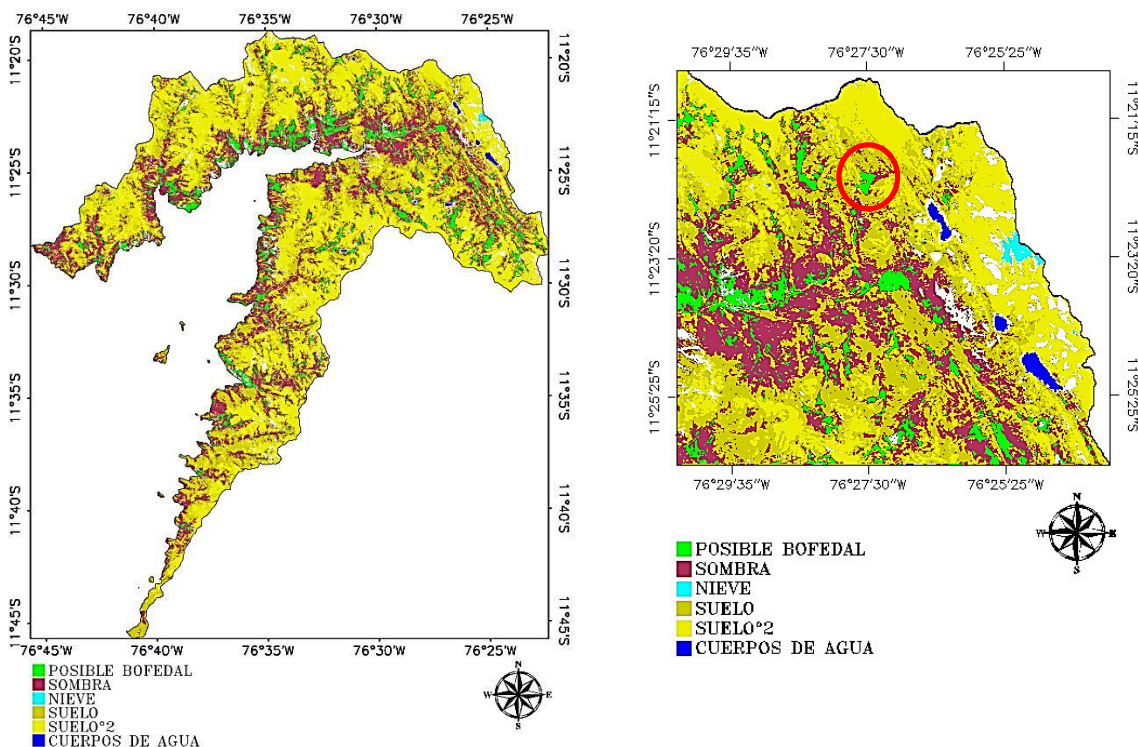
La Tabla 7 muestra los resultados que se obtuvieron al aplicar los diferentes tipos de CLS que presenta el software ENVI, la Tabla muestra que al aplicar la ecuación 5.1, el clasificador que mejor resultados presenta para la clasificación de bofedales es la CLS “Paralelepiped” (Paralelepiedo).

### 5.3.2.7 APLICACIÓN DE CLASIFICACIÓN PARALELEPÍPEDO

Luego de aplicar el clasificador Paralelepípedo, se observa que el bofedal Chunal está zonificado (color verde, correspondiente a la clase bofedal) y también los bofedales que se encuentran a sus alrededores, se muestra que estos también son bofedales ya que los trabajos de campo que se realizaron corroboran su clase. En la Figura 5.25, Figura 5.25 B

A

B



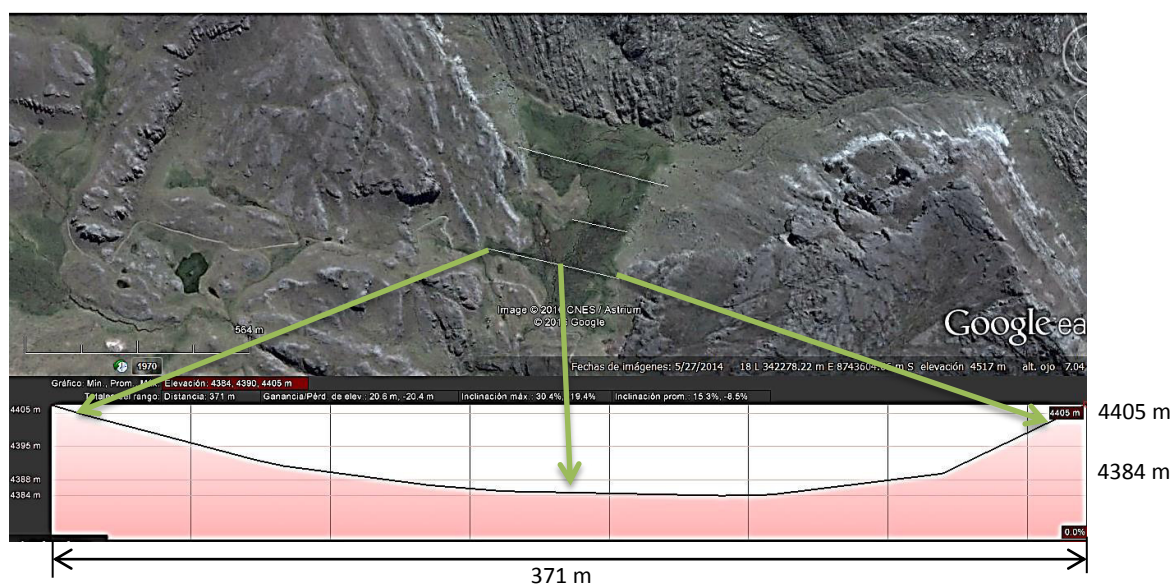
**Figura 5.25.** A) CLS, CRCH. B) CLS en los trabajos de campo

La Figura 5.25 muestra los resultados de la CLS de CRCH, en ella se presentan 2 imágenes A y B, en A se muestra el total de la cuenca y en B las zonas aledañas al trabajo de campo, mediante la CLS paralelepípedo. Se obtuvieron las 6 clases previamente asignadas mediante unas zonas de entrenamiento incorporados en el software ENVI.

Para determinar % de las áreas de las bofedales y las áreas de las clases de la Figura 5.25 fue necesario determinar el valor de la pendiente de los bofedales, procedimiento que se describe a continuación

### 5.3.2.8 PENDIENTE DEL BP CHUNAL

Se ha observado en los trabajos de campo que los bofedales y BP poseen poca pendiente. .  
Figura 5.26.



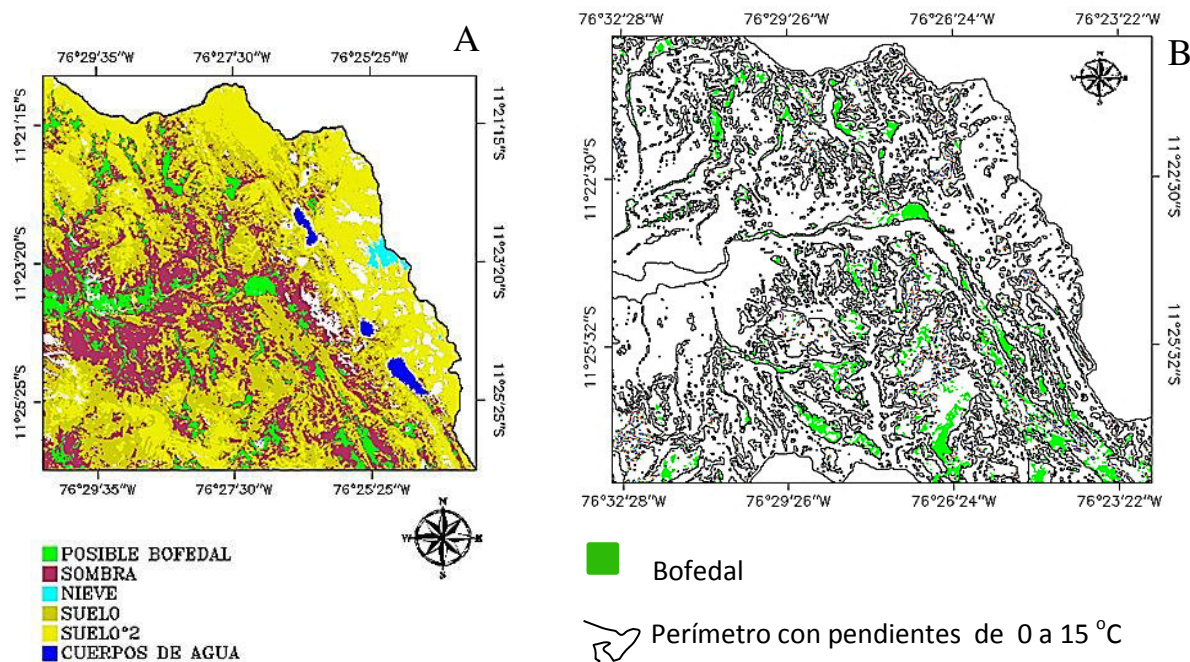
**Figura 5.26.** Pendiente del BP. Escala grafica 1/22000

En la Figura 5.26 se observa el cálculo de pendientes promedio del BP, para esto se tomó tres líneas a las cuales se calcularon la pendiente, y se sumó pendiente del bofedal el promedio de pendientes de estas tres líneas, la cual fue de 15°.



### 5.3.2.9 GENERACIÓN DEL PERÍMETRO GIS DE PENDIENTES

Una vez calculada la pendiente promedio máxima del BP se generó, un rango de pendientes entre cero y quince grados 5.29. El archivo de perímetros de los bofedales encuentra en el Anexo digital Archivo.

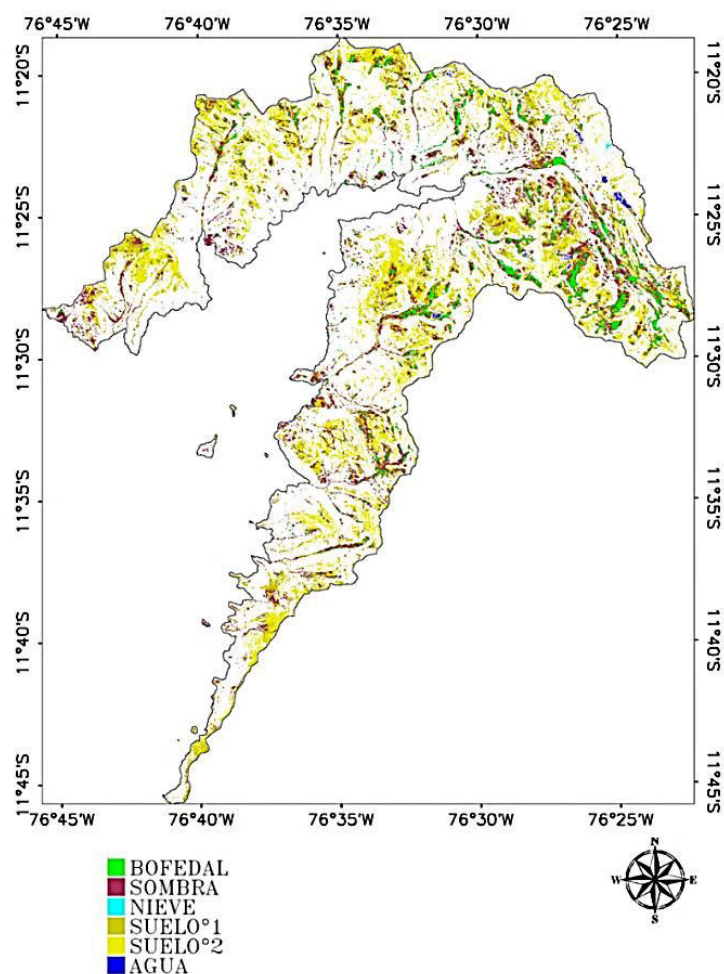


**Figura 5.27.** A) Imagen Paralelepípedo. B) Detalles

La figura 5.27 muestra en 5.27 A el mapa de la clasificación paralelepípedo de la zonas cercanas a la zona de estudio en ella se observa los terrenos correspondientes a la clase bofedal, para introducir el parámetro de la pendiente del bofedal al mapa “A” se le aplicara un corte un perímetro de pendientes comprendido entre 0 y 15°. De esta forma se obtiene el mapa de la figura 5.27 B que representa solamente los terrenos correspondientes a la clase bofedal con el rango de la pendiente calculado en los trabajos de campo, cuyo rango fue c máximo fue de 15°

### 5.3.2.10 GENERACIÓN DEL MAPA DE BOFEDALES, MÉTODO ÍNDICES (M.I)

Luego de establecer los valores del BP, IDV (0.44-0.83), IDA (-0.85—0.512), IDI (0.002-0.47), pendiente (0-15°), se generó un mapa de bofedales con el método índices. El área total para bofedales es de 1862.55 ha, que representa 0.76 % del área total cuenca del río Chillón, Figura 5.28



**Figura 5.28** Mapa de bofedales, método Índices cabecera de CRCH.

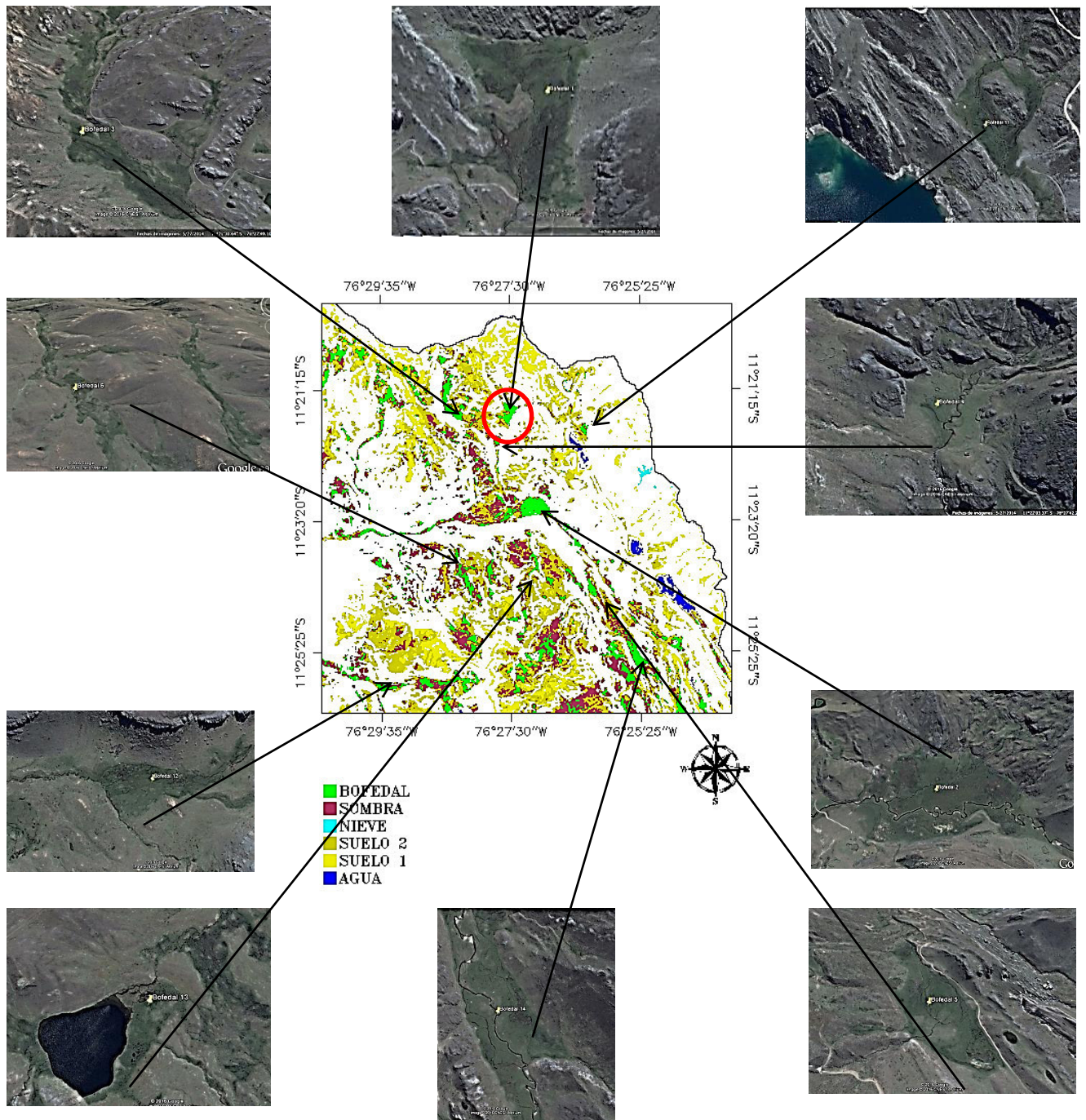
La Figura 5.28 corresponde al mapa de bofedales generado mediante el método índices, en ella se pudo calcular las áreas totales de los bofedales (1862.55 ha) así como también el porcentaje que representa de toda la cuenca del río Chillón (0.76 %). Para las otras clases se

obtuvieron aproximadamente los siguientes porcentajes clase sombra (5.9 %), clase nieve (0.009%), clase suelo 1 (7.9%), clase suelo 2 (7.8%), clase agua (0.01%).

#### **5.3.2.11 VALIDACIÓN DEL M.I**

Con la finalidad de validar la confiabilidad de los bofedales mapeados por esta metodología se procedió a comparar las áreas clasificadas como Google-Earth. Tomando como base la zona cercanas a los trabajos de campo, y cercanos al BP Chunal. Se tomaron 51 zonas consideradas como bofedal, según la metodología, de los cuales resultaron siendo bofedal 49 zonas, que equivale a un porcentaje de acierto aproximado de 96 % (Figura. 29)





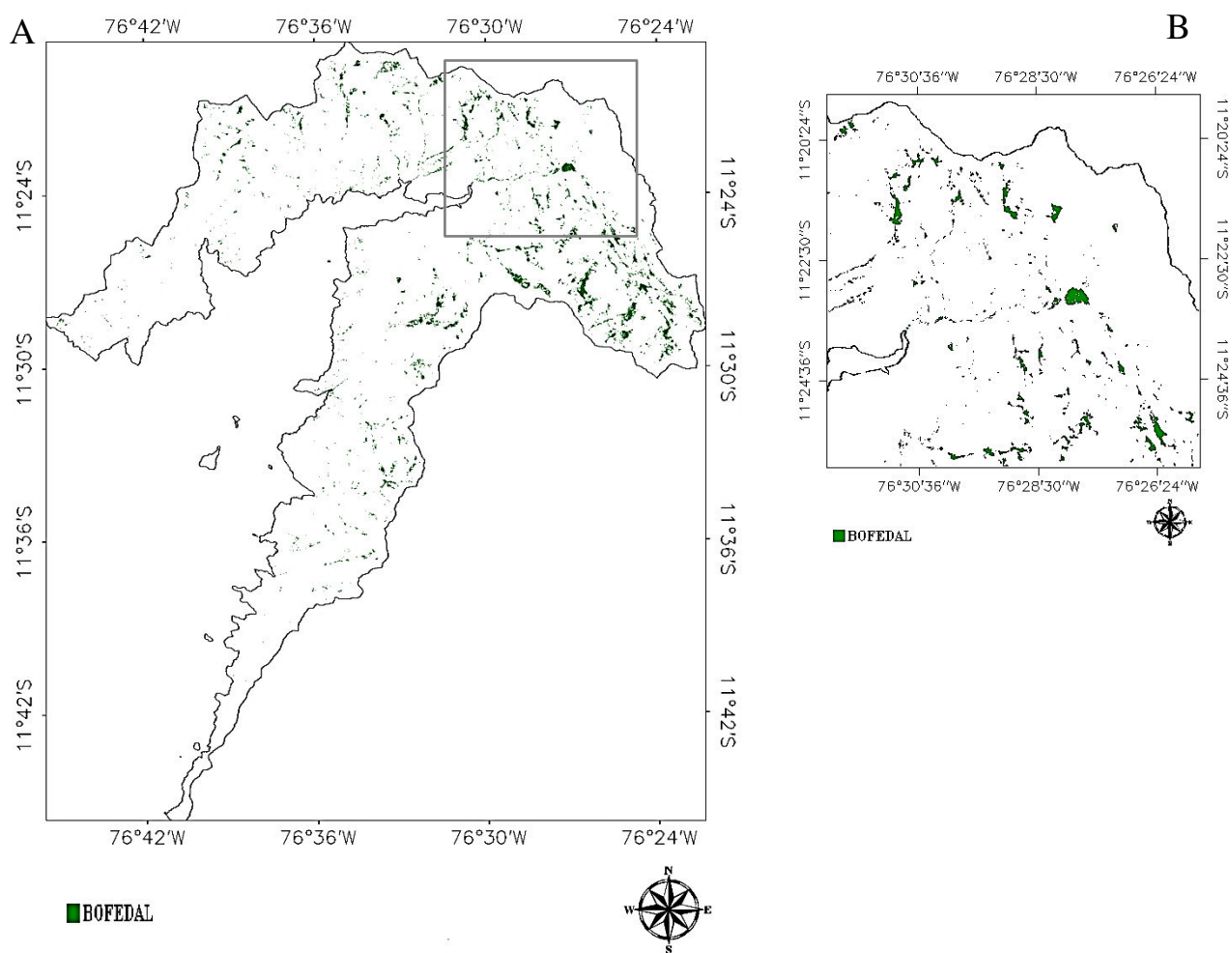
**Figura 5.29** Validación del método Índices

La Figura 5.29 muestra parte de las zonas que se eligieron para ser verificadas como bofedales, De las 51 zonas consideradas como bofedal según la metodología, con exactitud de 96 % . También se observó que todos los bofedales mayores a 200 píxeles, clasificados por la metodología, correspondieron a bofedales del programa Google Earth, de la misma forma se observa que bofedales mapeados entre 10 a 200, píxeles. Parte de las imágenes y

coordenadas de los puntos tomados para la validación de la metodología se encuentran en el Anexo Archivo

### 5.3.2.12 OBTENCIÓN BOFEDALES MEDIANTE EL M.I

Los bofedales se muestran en Las Figura 5.32 A, Figura 5.32 B. y de la zona cercanas a los trabajos de campo Figura 5.32 B. El archivo de perímetros GIS de los bofedales se encuentra en el Anexo Archivo.



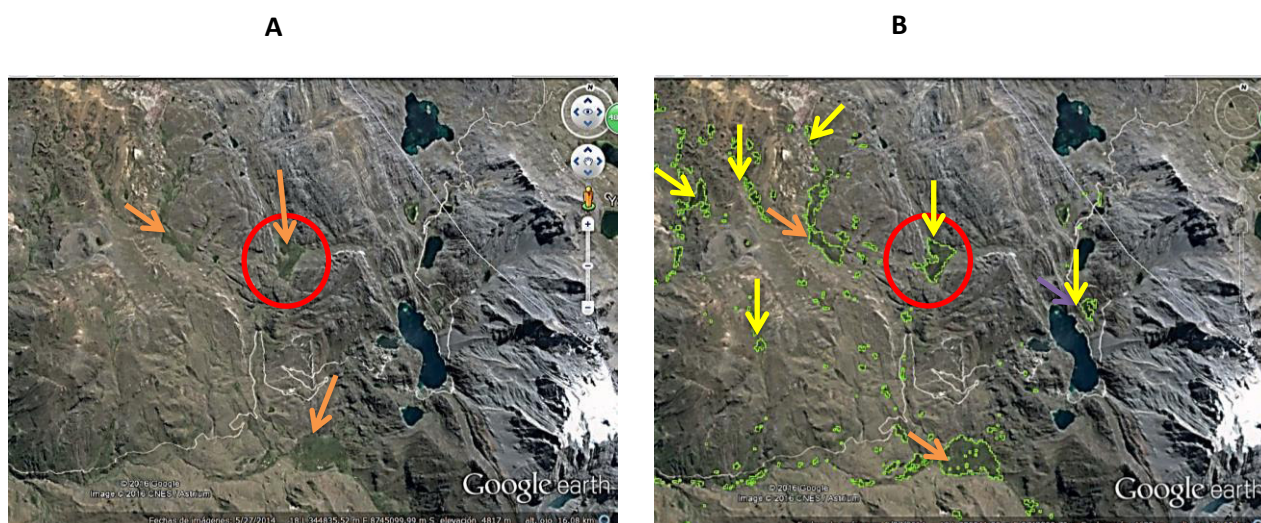
**Figura 5.30.** A) Bojedales, M.I, CRCH. B) bofedales cercanos al BP

Figura 5.30 muestra en “A” los perímetros de bofedales, en color verde, CRCH generado (método índices). En “B” se muestra bofedales próximos al BP



### 5.3.2.13 PERÍMETROS DE BOFEDALES, MÉTODO INDICES, EXPORTADOS AL GOOGLE-EARTH

Una vez generado los perímetro GIS de bofedales se procedió a exportarlos al programa informático Google Earth Pro, así se pudo visualizar como estos vperimetros de bofedales generados por el método índice calzaron en los bofedales presentes en el Google Earth Pro Figura 5.31. Aquí el programa informático Google Earth Pro fue de ayuda para visualizar solamente los perímetros de bofedales generados el programa no realizo una clasificación de bofedales.



**Figura 5.31** A) Lugar próximo al BP. B) Lugar próximo al BP y bofedales. Escala aproximada 1/110000. Fecha de la imagen 5 de mayo del 2014

La Figura 5.31 A muestra una imagen de BP (En círculo rojo). En la Figura 5.31B los perímetros de bofedales líneas verdes encaja en los bofedales y también de menores tamaños, señalados con flechas amarillas.

Otra forma de validar los resultados de la metodología fue comparándola con el mapa ecosistémico elaborado por el MINAM 2015. En la Figura 5.32, se observa que el mapa elaborado por el MINAM no considera todos los bofedales, solamente los bofedales de gran tamaño, además de apreciarse un desplazamiento al oeste del mapa elaborado y las imágenes del Google Earth.



Bofedales generados por el MINAM



Bofedales generados por el método Índices

**Figura 5.32.** Se muestra una imagen del programa informático Google Earth en la cual se han colocado los perímetros de bofedales generados por el método Índices, color verde, también se observa los bofedales generados por el Ministerio de Ambiente, MINAM, color rojo. Escala gráfica 1/ 110000

La figura 5.32 muestra los bofedales generados por el MINAM 2015 en color rojo, y los bofedales generados por el método Índices, en color verde, se observa que los bofedales generados por el método Índices son más exactos.

## **5.4 COMPARACIÓN DE AMBAS METODOLOGÍAS**

Comparando el Método “Endmember” y el Metdodo Índices se obtuvo que para el método endmembers el área de bofedales en CRCH representa 0.88 % del área de toda la cuenca, y mediante el método de índices un valor 0.76 %. Los datos de los perímetros se encuentran en el Anexo digital Archivo.

## **5.5 FUSIÓN DE AMBAS METODOLOGÍAS**

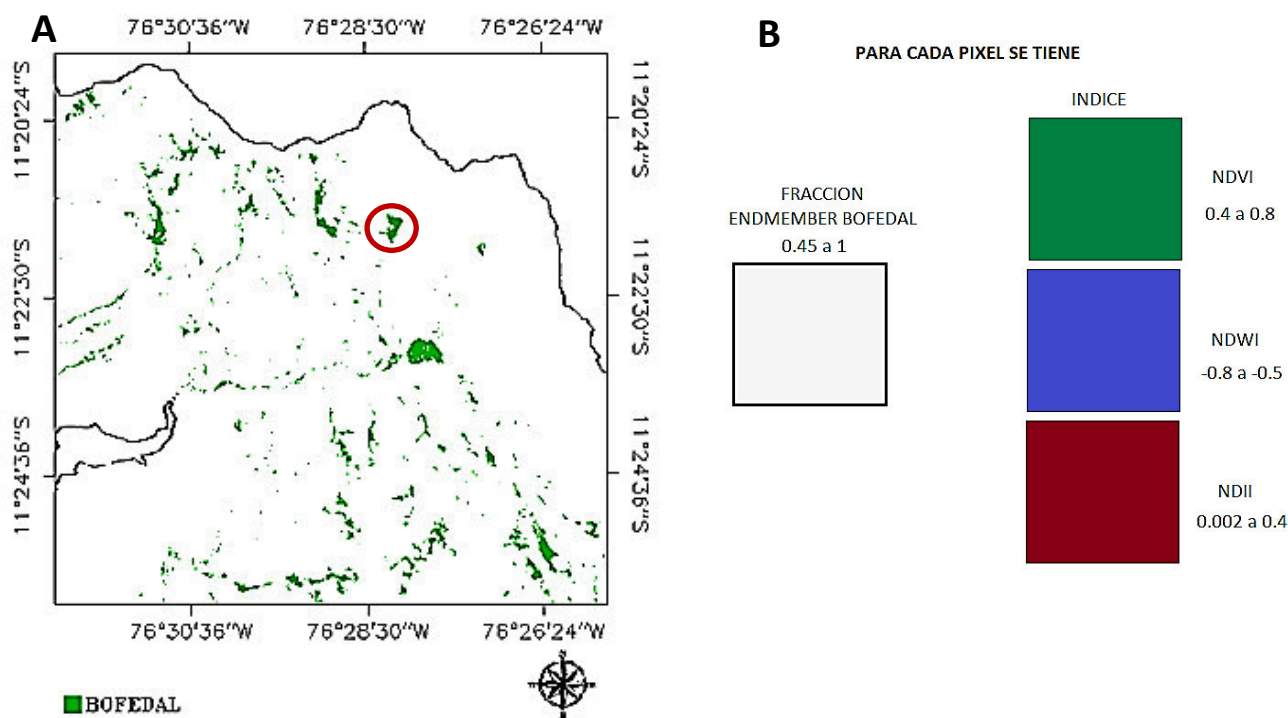
Si bien los resultados alcanzados muestran que tanto el método Endmember, como el método Índices logran mapear, por separado, los bofedales CRCH, las metodologías independientemente tienen procedimientos distintos. En el método de “endmember” se eligió un “enbmember” bofedal para generar el mapa de bofedales, sin la necesidad de recurrir al análisis de los índices IDV, IDA y IDI; índices que son importantes para ver las características propias de los bofedales, como son también la vegetación, humedad, pendiente del terreno. En el método de índices se analizó los IDV, IDA, y IDI, luego realizó una CLS de las “bandas” IDV, IDA y IDI y posteriormente la delimitación a terrenos con pendientes menores a 15°, para y generar finalmente el mapa de bofedales.

Como el fin de simplificar y generar un índice de bofedal, teniendo en cuenta los resultados de ambas metodologías, se procedió a analizar la relación de ambas metodologías, para ello fueron tomados los resultados obtenidos hasta hora. De la metodología EM se tomó en cuenta los siguientes resultados: el perímetro de bofedales y el valor de la fracción EM de bofedal. Del método basado en índices se tomaron en cuenta los valores de los índices IDV, IDA y IDI de bofedales. Posteriormente se analizaron correlaciones existente entre la fracción EM bofedal con cada índice.

### **5.5.1 CORRELACION ENTRE LA FRACCION DE “ENDMEMEBER” BOFEDAL Y LOS INIDICES IDV, IDA, IDI.**

Del mapa de bofedales para el año 2014, siguiendo el método EM, y de los resultados anteriores se observa que para cada píxel existen 4 variables importantes que han sido de utilidad para realizar el mapeo de bofedales; estas variables son: La fracción EM de bofedal

calculada en la metodología “Endmember”, los rangos del IDV, IDA y IDI para los bofedales, Figura 5.33.



**Figura 5.33** A) Bofedales CRCH. B) Variables para cada pixel

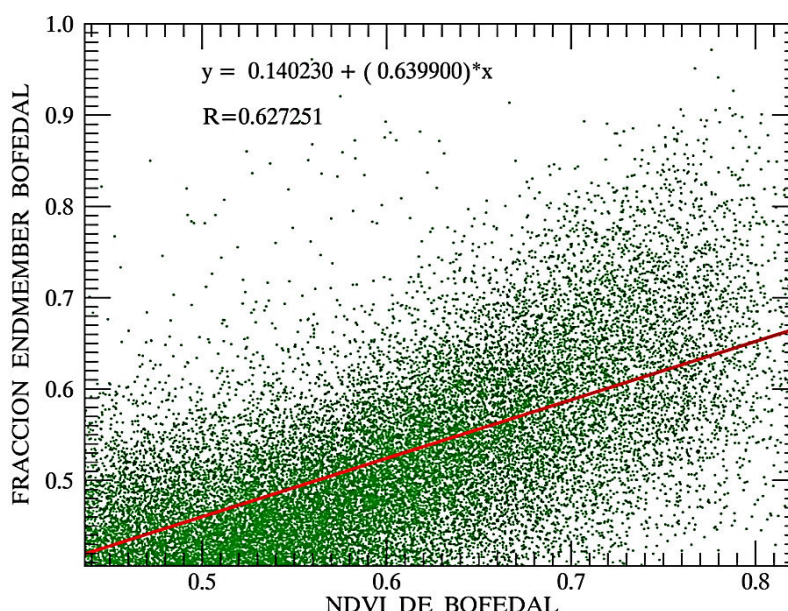
La Figura 5.33 Bofedales para CRCH, este mapa fue generado mediante el método “endmember”, los rangos de los índices IDV, IDA, y IDI, fueron obtenidos por la método índices y delimitados por el perímetro de bofedales generado por la metodología “endmember”, para así obtener los rangos de estos índices solo de bofedales. En B, se aprecia de forma simbólica el rango de los índices que contiene cada pixel.

#### 5.5.1.1 CORRELACION ENTRE LA FRACCION ENDMEMBER BOFEDAL Y EL IDV DE LOS BOFEDALES

Con la finalidad de calcular el nivel de correlación entre los valores de la fracción “endmember” de bofedales y el IDV de bofedales para CRCH se realizó una gráfica de los



valores IDV vs. Fracción “endmember” del bofedal para cada pixel que de la clase bofedales, 23635 píxeles, Figura 5.34. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo

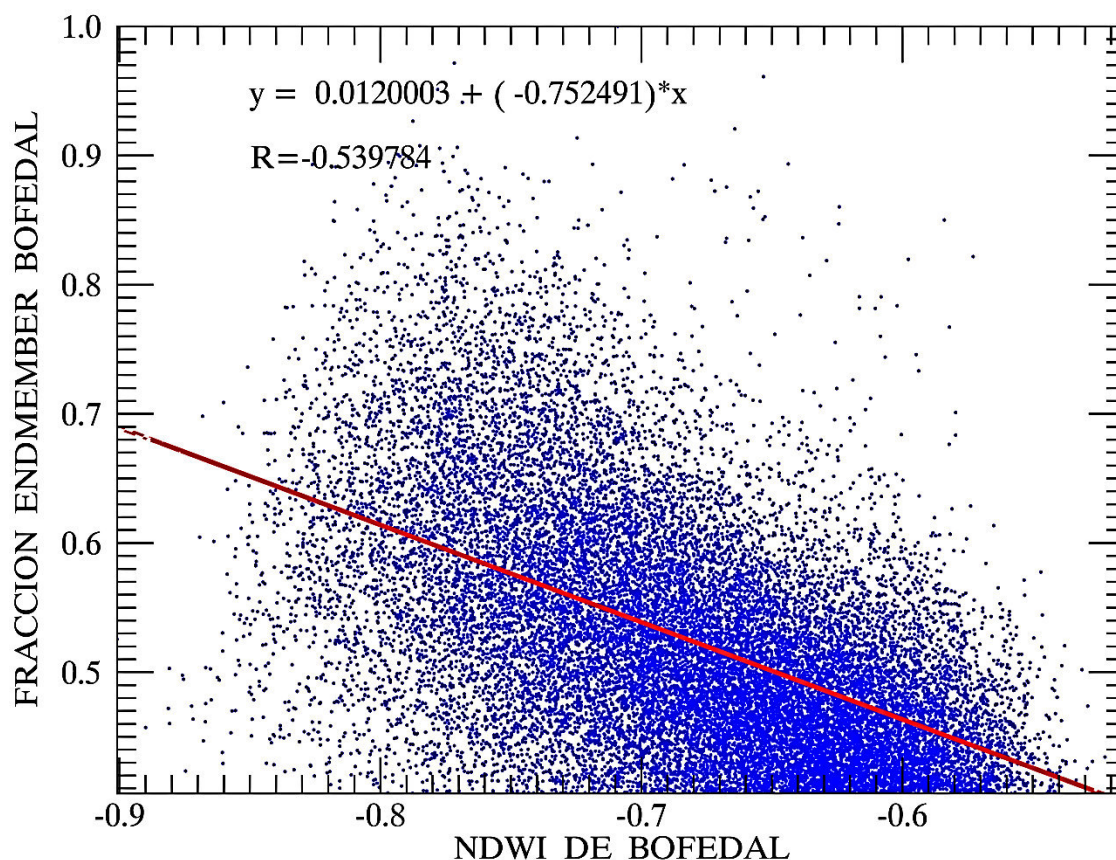


**Figura 5.34.** Gráfico de la fracción EM bofedal vs. IDV de bofedales. La línea roja muestra la regresión lineal.

En la Figura 5.34 se muestra, en color verde los puntos que pertenecen a la clase bofedal. También se aprecia los rangos para la fracción “endmember” bofedal, que para los bofedales se encuentra desde 0.45 a 1 pertenecientes al eje Y, además se muestra el rango para el IDV de bofedales que es de 0.43 a 0.82 pertenecientes al eje X. La gráfica presenta una la correlación positiva moderada con un  $R = 0.63$ .

#### **5.5.1.2 CORRELACION ENTRE LA FRACCION “ENDMEMBER” BOFEDAL Y EL IDA DE LOS BOFEDALES**

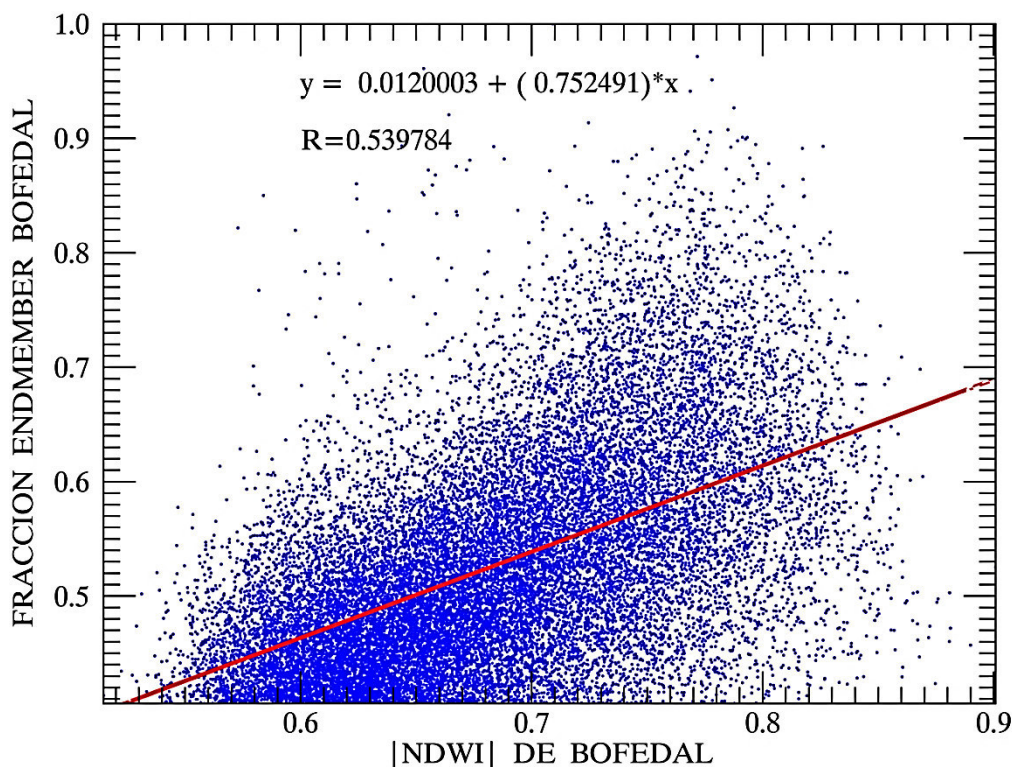
Como en el caso anterior se procedió calcular la correlación entre los valores de la fracción endmember de bofedales y el IDA de los bofedales para CRCH, se realizó una gráfica con los valores de fracción “endmember” vs. IDA para cada pixel que de la clase bofedales, 23635 píxeles, Figura 5.35. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo



**Figura. 5.35.** Gráfico fracción EM bofedal vs. IDA de bofedales, en línea roja se muestra la regresión lineal. En la Figura. 5.35 se muestra en color azul a todos los puntos que pertenecen a la clase bofedal para CRCH. Se muestra también los rangos para la fracción “endmember” bofedal, que para los bofedales se encuentra entre 0.45 a 1 pertenecientes al eje Y. Además, se muestra el rango para el IDA de bofedales que es de -0.9 a -0.51 pertenecientes al eje X. La gráfica presenta una correlación negativa moderada con un  $R = 0.54$ .

En lo sucesivo se tomara el valor absoluto del IDA para efectos de visualización y comparaciones posteriores. Para este caso se realizó la grafica entre la fracción “endmember” bofedal y el valor absoluto del IDA, Figura 5.36.



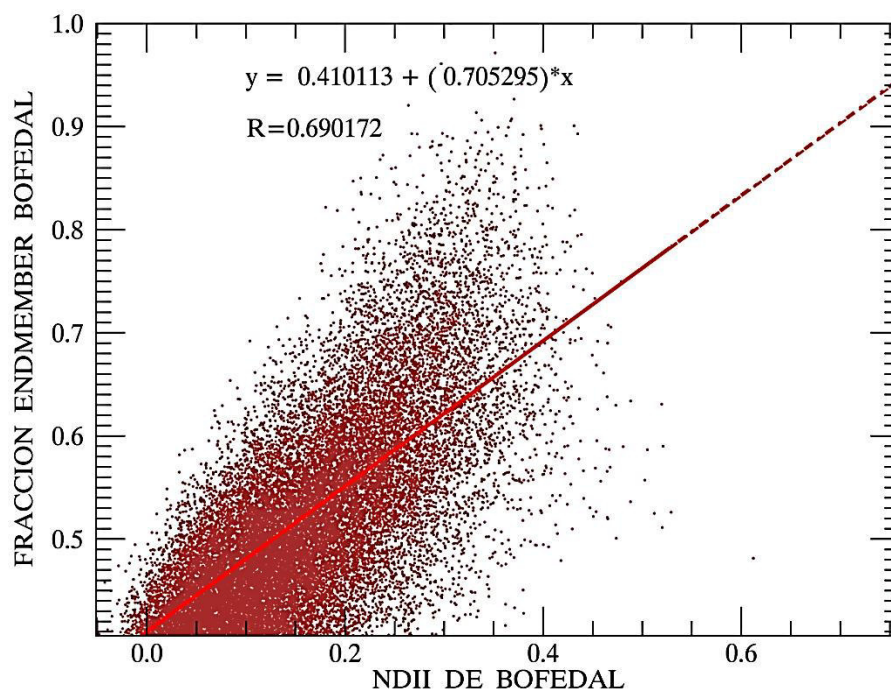


**Figura. 5.36.** Gráfico fracción EM bofedal vs. valor absoluto de IDA de bofedales, en línea roja se muestra la regresión lineal.

Figura 5.36 muestra el valor absoluto del IDA vs. La fracción “endmember” bofedal representación se ha realizado para efectos de visualización y correlaciones.

### 5.5.1.3 CORRELACION ENTRE LA FRACCION “ENDMEMBER” BOFEDAL Y EL IDI DE LO BOFEDALES

Al igual que en los casos anteriores se realizó una gráfica de la fracción EM vs. el IDI de los bofedales para CRCH con todos los píxeles. que corresponde a la clase bofedal, 23635 píxeles, Figura 5.37. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo.



**Figura 5.37.** Gráfico fracción EM bofedal vs. IDI de bofedales. La línea roja muestra la regresión lineal.

En la Figura 5.37 se muestra en color marrón los puntos que pertenecen a la clase bofedal para CRCH. Se muestra, también, los rango para la fracción “endmember” bofedal, que se encuentra desde 0.45 a 1 pertenecientes al eje Y. Además, se muestra el rango para el IDI de bofedales es de 0.002 a 0.4 pertenecientes al eje X. La correlación es positiva moderada con un  $R = 0.69$ .

### 5.5.2 ELECCIÓN DE LOS INDICES PRINCIPALES DEL BOFEDAL

Basados en que el IDI de los bofedales tiene mejor correlación con la fracción “endmember” bofedal que los otros índices. Basados también en los resultados de la Figura 5.15, en la cual se observa a la firma espectral del “endmember” bofedal ,perteneciente al BP Chunal, que presentan los porcentajes de reflectancias en las regiones:  $\rho_{\text{GREEN}}$  (verde): 0.037;  $\rho_{\text{NIR}}$ : 0.3520,;  $\rho_{\text{SWIR}}$ : 0.1869. Para obtener un alto porcentaje de reflectancia se realizó la diferencia de la región  $\rho_{\text{GREEN}}$  con la región  $\rho_{\text{NIR}}$  (la cual sería la primera relación) de la misma manera se realizó la diferencia de la región  $\rho_{\text{NIR}}$ , con la región  $\rho_{\text{SWIR}}$  (la cual sería la segunda relación). Se muestra que la primera relación

se encuentra en el índice  $IDA = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{NIR}}{\rho_{GREEN} + \rho_{NIR}}$  ; y la segunda relación la esta en el índice  $IDI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$  .

Estos resultados fueron base para deducir una ecuación matemática entre los índices IDI, IDA y así encontrar una expresión matemática más sencilla que pueda detectar a los bofedales de manera más directa, Una vez conocido los índices principales a relacionar y teniendo en cuenta que el IDI tiene mejor respuesta con la fracción endmember bofedal, se desarrolló una ecuación matemática entre el los índices IDI, IDA, esta ecuación entre ambas detecta de forma directa, a los bofedales para CRCH. Gracias a esta relación entre el IDI y al IDA a continuación se propone un **ÍNDICE DE BOFEDAL**.

## 5.6. ÍNDICE DE BOFEDAL (IDB)

Como se mencionó anteriormente se propone un Índice de Bofedal cuya finalidad es zonificar de forma directa a los bofedales, sin la necesidad de calcular la fracción endmember de bofedal, no será necesario calcular el IDV, IDA, IDI, tampoco será necesario realizar un CLS, solo se necesitara relacionar tres bandas del sensor Landsat. A continuación en base de los resultados anteriores, se propone un índice de bofedal (IDB)  
Fuente: Elaboración propia,

$$IDB = \frac{IDI - IDA}{IDI + IDA} \quad 5.2$$

Desarrollando la ecuación 5.2 según las ecuaciones 1.9 y 1.10 de la Tabla 1 del Capítulo 2, la ecuación 5.2 también se puede expresar en función de las bandas  $\rho_{GREEN}$ ,  $\rho_{NIR}$  y  $\rho_{SWIR}$  según: De la Tabla 1 del Capítulo 2 se tiene que:

$$IDA = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{NIR}}{\rho_{GREEN} + \rho_{NIR}}; \quad IDI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$$

Haciendo los siguientes cambios de variables, sea:

$$\rho_{GREEN} = A; \quad \rho_{NIR} = B; \quad \rho_{SWIR} = C$$

Haciendo los cambios de variables en la ecuación 5.2 tiene la siguiente expresión:

$$IDB = \frac{\frac{B-C}{B+C} - \frac{A-B}{A+B}}{\frac{B-C}{B+C} + \frac{A-B}{A+B}}$$

Desarrollando tenemos:

$$IDB = \frac{\frac{(B-C)(A+B) - (A-B)(B+C)}{(B+C)(A+B)}}{\frac{(B-C)(A+B) + (A-B)(B+C)}{(B+C)(A+B)}}$$

$$IDB = \frac{(A.B) + (B^2) - (A.C) - (B.C) - [(A.B) + (A.C) - (B^2) - (B.C)]}{(A.B) + (B^2) - (A.C) - (B.C) + [(A.B) + (A.C) - (B^2) - (B.C)]}$$

$$IDB = \frac{(A.B) + (B^2) - (A.C) - (B.C) - (A.B) - (A.C) + (B^2) + (B.C)}{(A.B) + (B^2) - (A.C) - (B.C) + (A.B) + (A.C) - (B^2) - (B.C)}$$

Simplificando tenemos:

$$IDB = \frac{2B^2 - 2(A.C)}{2(A.B) - 2(B.C)} = \frac{B^2 - (A.C)}{B(A - C)}$$

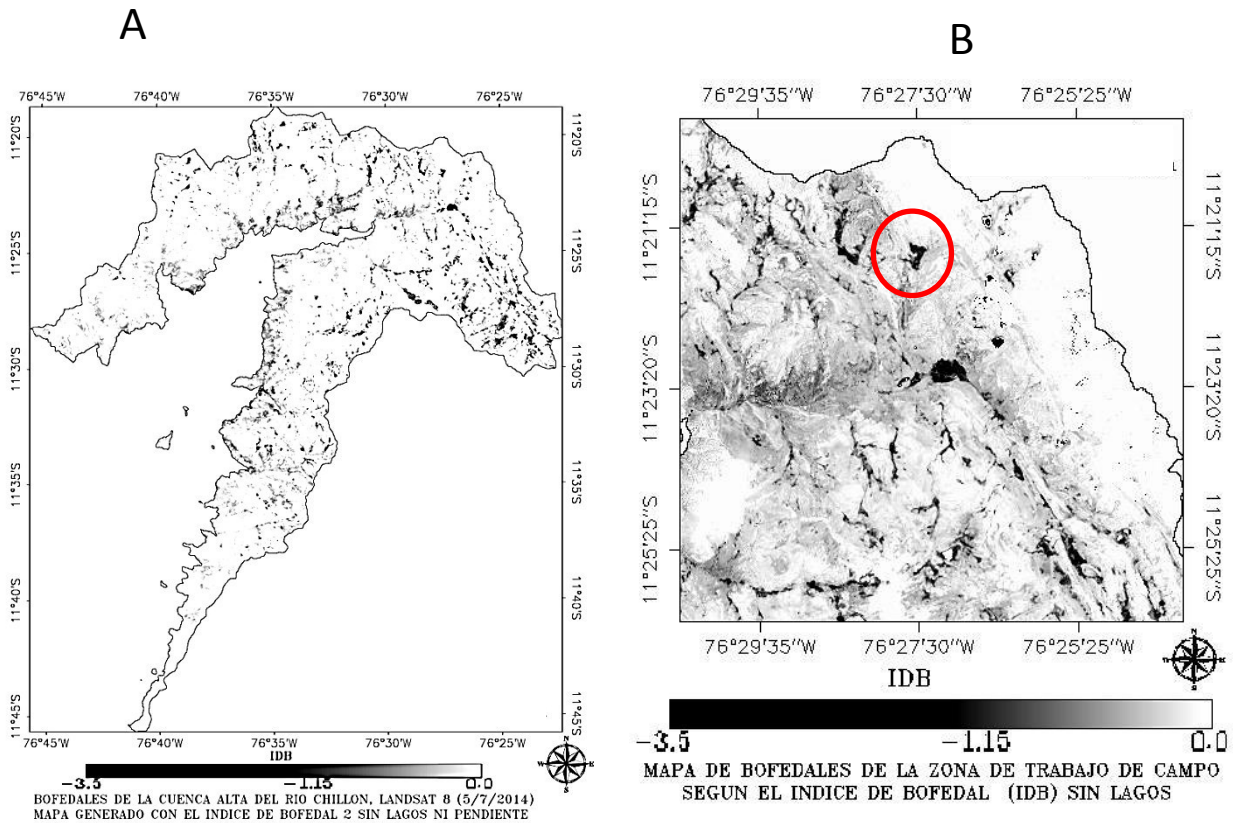
Remplazando los valores de A, B y C en la ecuación 5.2 se obtiene:

$$IDB = \frac{NDII - NDWI}{NDII + NDWI} = \frac{B^2 - (A.C)}{B(A - C)} = \frac{(\rho NIR)^2 - (\rho GREEN \times \rho SWIR)}{\rho NIR(\rho GREEN - \rho SWIR)}$$

$$IDB = \frac{(\rho NIR)^2 - (\rho GREEN \times \rho SWIR)}{\rho NIR(\rho GREEN - \rho SWIR)} \quad 5.3$$

### 5.6.1 GENERACIÓN DEL MAPA DEL BOFEDALES: METODO IDB.

Al aplicar la ecuación 5.3 a cualquier imagen de la Tabla 3 del Capítulo 4, que previamente se le realizó el preprocesamiento, y una corrección atmosférica con el modelo FLAASH, se observa que los bofedales están claramente zonificados en color negro entre los rangos de -3.5 a -1.15, según lo corrobora los trabajos de campo realizados, en la Figura 5.38.



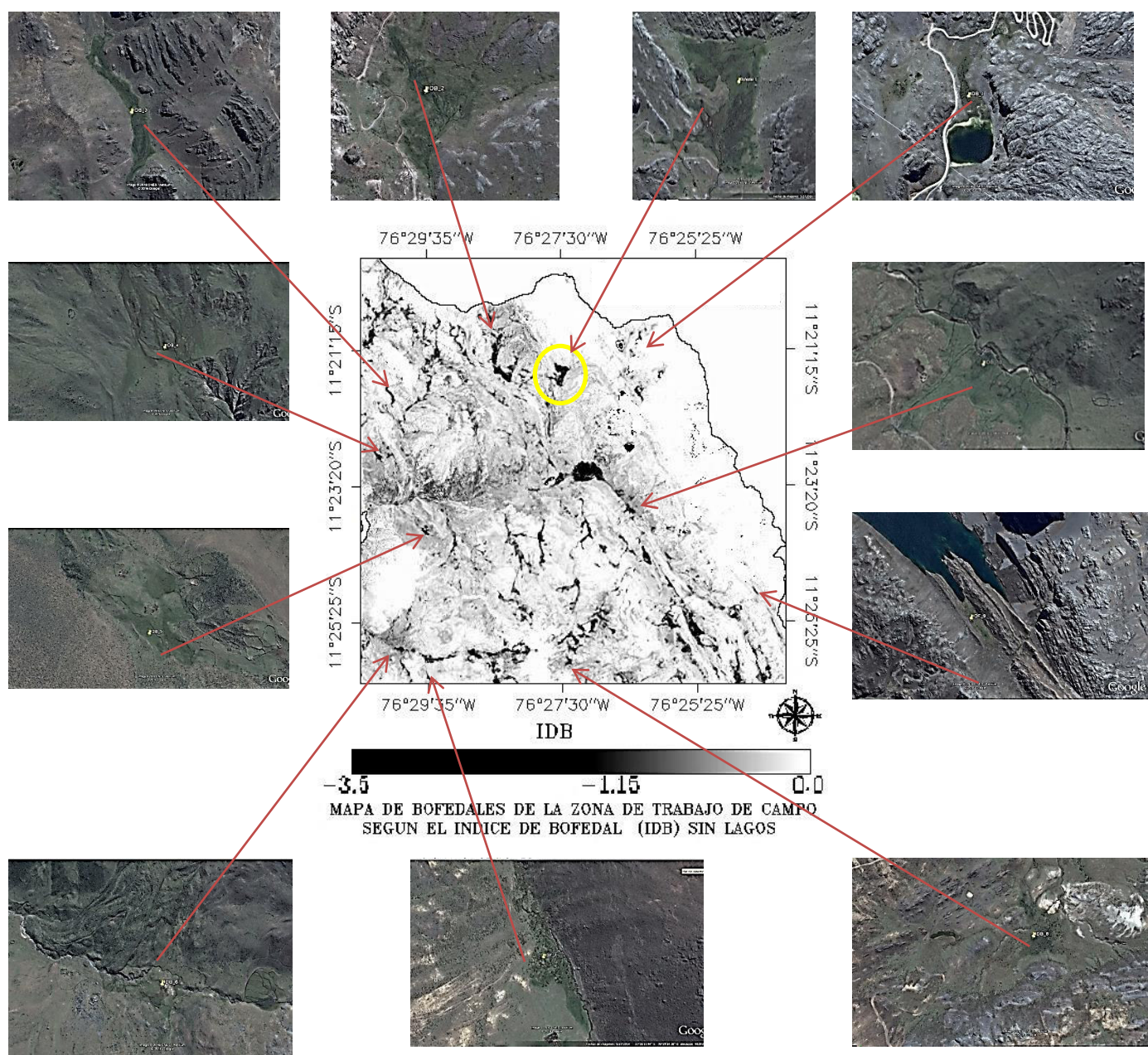
**Figura 5.38.** A) IDB, CRCH. B) IDB lugar cercano al trabajo de campo, se observa que las zonas oscuras corresponde a las áreas de los bofedales

En la Figura 5.38 A se encuentran los bofedales para CRCH que fue generado por el método IDB, en ella se observa que existen zonas de negro que representan las áreas de bofedales, estas zonas son pequeñas comparadas con el tamaño de la cuenca. En la Figura 5.38 B se muestra el mapa de bofedales generado por el método IDB de los lugares cercanos al trabajo de campo y al BP (círculo rojo), se aprecia con más detalle que los bofedales se encuentran zonificados en tonalidades de color negro, y que estas zonas son claramente distinguibles de las demás áreas.

## 5.6.2 VALIDACIÓN DEL ÍNDICE DE BOFEDAL

Luego de este mapa se tomaron 61 puntos de verificación (cada punto dentro de un bofedal), 40 correspondientes a bofedales que se encuentran dispersados en toda la cuenca, 11 corresponde al bofedales cercanos al BP Chunal, y otros 10 puntos muy pequeños zonas oscuras. Luego, se realizó un análisis de gabinete que consintió en exportar los puntos al programa informático “Google-Earth Pro”, en las imágenes del Google Earth se corroboró que 60 puntos son bofedales, esto corresponde a un acierto de 98.36 % . Figura 5.39.





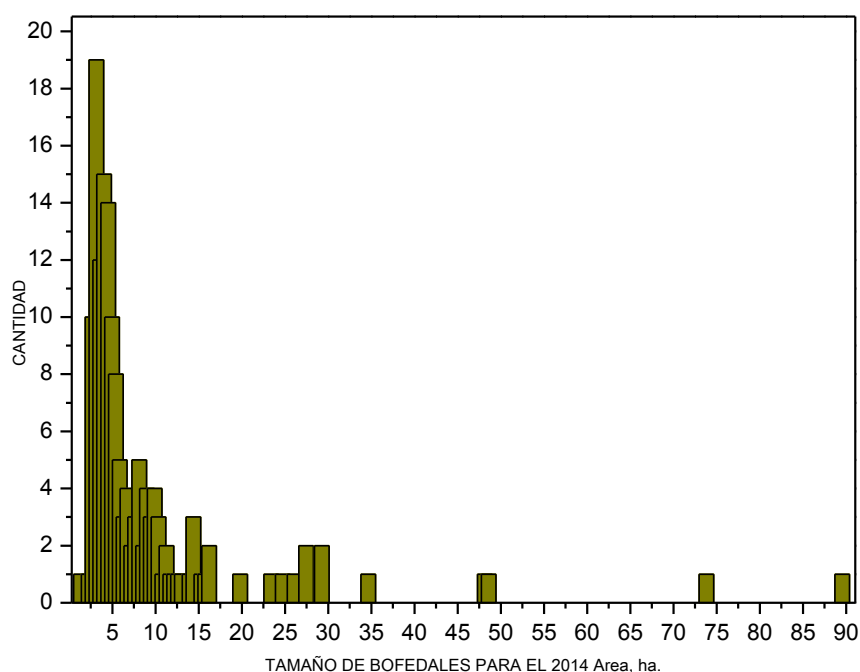
**Figura 5.39.** Validación del Mapa de bofedales identificados por el Método IDB. Con imágenes del “Google Earth Pro”

La Figura. 5.39 muestra el mapa de la distribución de bofedales generado por el IDB de la zona cercana al BP y su respectiva visualización de puntos exportados en el programa informático “Google Earth Pro”. Con el mapa de bofedales para el 5 de julio del 2014 generando por el IDB se los perímetros GIS de bofedales y con esto se calculó el área aproximada de bofedales de 1600 ha. un 0.65 % del CRCH. Parte de las imágenes y

coordenadas de los puntos tomados para la validación de la metodología y los perímetros de bofedales se encuentran en el Anexo digital Archivos

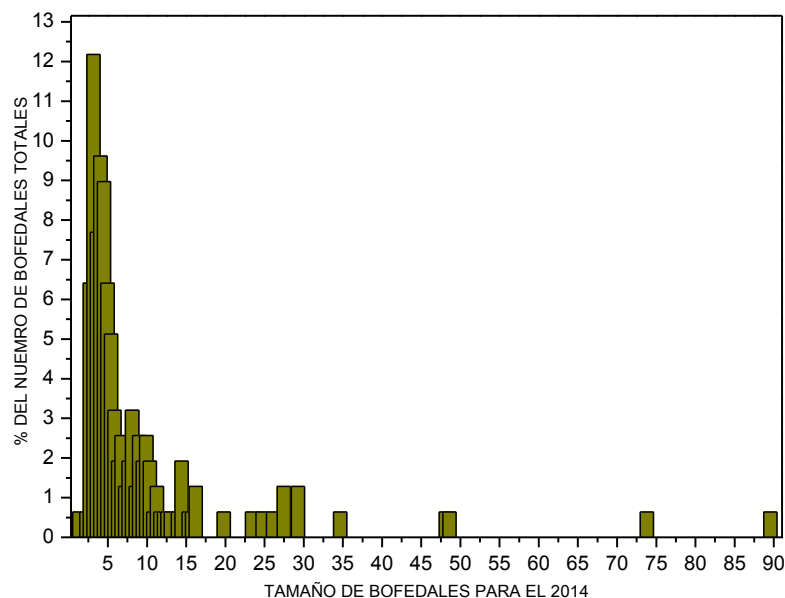
### 5.6.3 CLASIFICACIÓN DE BOFEDALES SEGÚN SU EXTENSIÓN

Para la fecha, 5 de julio del 2014, se detectó 156 bofedales de diferentes tamaños (área superficial), distribuidos por CRCH, a continuación se observa la distribución para bofedales distribuidos según el tamaño (en ha del bofedal.) y cantidad de bofedales Figura 5.40. Y la distribución de bofedales clasificados por el tamaño y porcentaje que representa Figura 5.41.



**Figura 5.40.** Distribución de bofedales, cantidad su tamaño en ha.

En la Figura 5.40, se presenta una gráfica que muestra el tamaño de los bofedales, tamaño calculado con la cantidad de pixeles encontrados por bofedal (eje horizontal en barras de color verde) y la cantidad de estos bofedales (eje vertical), se aprecia, por ejemplo, que en la cuenca existen predominantemente bofedales con tamaños aproximado a 5 ha. También existen pocos bofedales de 35 ha, 75 ha y 89 ha. Los datos se encuentran en el Anexo Archivo



**Figura 5.41.** Distribución de bofedales, valor porcentual según tamaño de bofedales en ha.

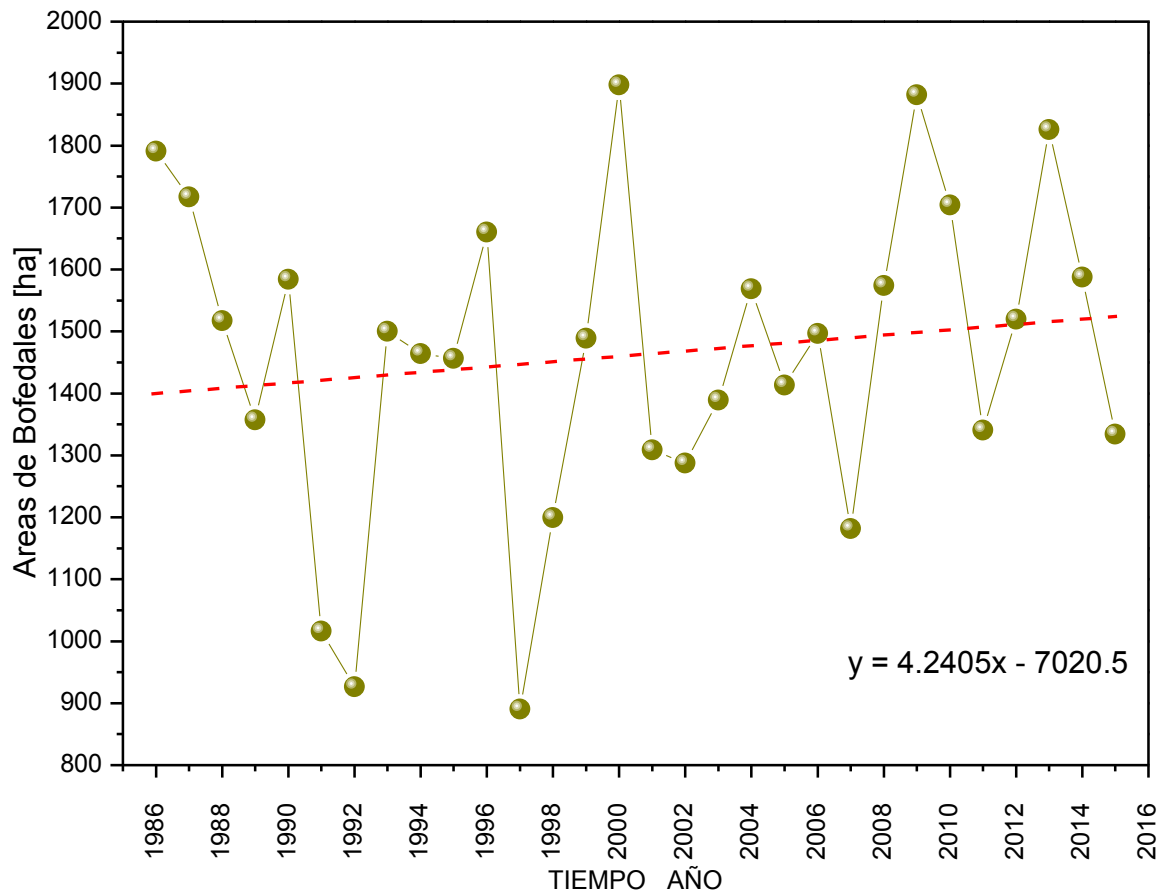
En la figura 5.41, se presenta una gráfica (histograma) que muestra, como el caso anterior, el tamaño de los bofedales, tamaño calculado con la cantidad de pixeles encontrados por bofedal (eje horizontal en barras de color verde) y el porcentaje que representa del total de bofedales (eje vertical). Se observa, por ejemplo, que bofedales con tamaño aproximado a 5 ha. representan aproximadamente el 12 % del total de bofedales de cabecera de cuenca. Los datos de este histograma se encuentran en el Anexo Archivo

## 5.7 EXTENSION DE BOFEDALES 1986 AL 2015

Empleando el IDB propuesto, se calculó los bofedales en el periodo del 1986 al 2015, 30 imágenes.. 5.42.

Los datos de estas graficas estan en el Anexo Archivo





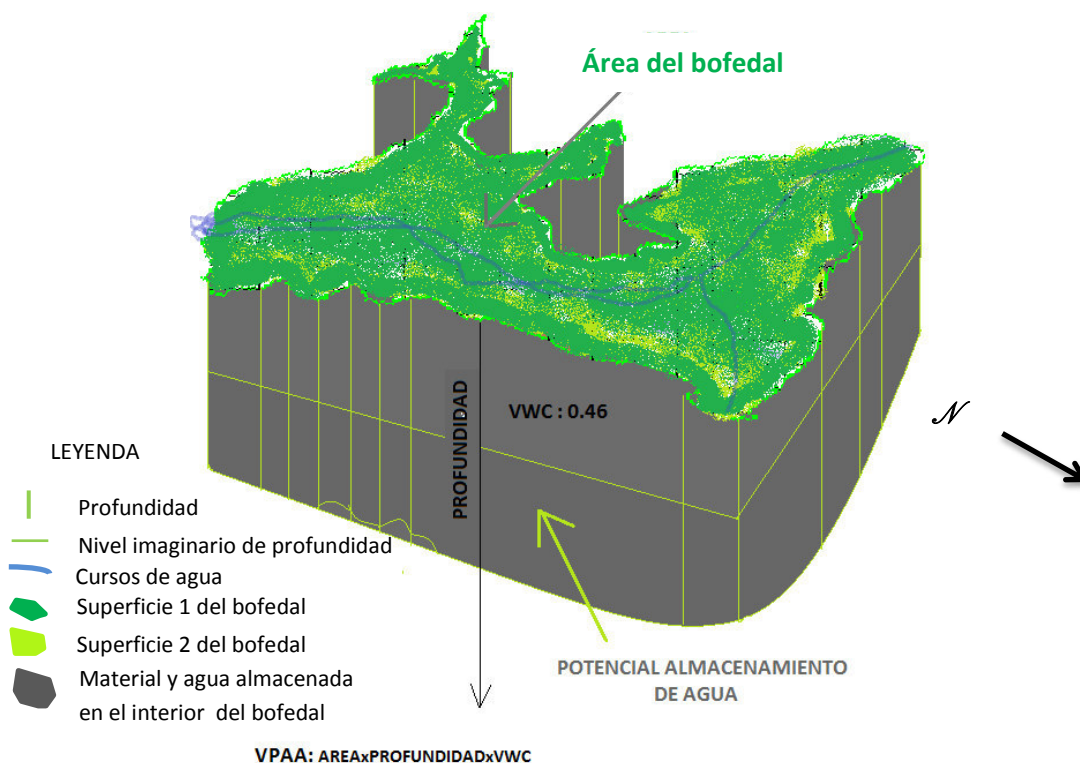
**Figura 5.42.** Serie de tiempo del área total de bofedales CRCH, del 1986 al 2015

En la Figura. 5.42 se presenta la cantidad del área total de bofedales en CRCH desde 1986 hasta 2014, Se muestra que para el año 1997 los bofedales presentan un valor mínimo extremo de 890.6 ha. y para el año 2000 el área total de bofedales presenta un máximo extremo de 1887.65 ha. Esta dinámica será comparada con otras variables como la precipitación, Anexo F, ocurrencias de fenómenos estacionales como el Niño, entre otros.

### 5.7.1 PROFUNDIDAD ASUMIDA DEL BP CHUNAL

La profundidad de los bofedales es un parámetro poco estudiado. En esta sección al hablar de profundidad de bofedales, se refiere a la profundidad del muestreo de parámetros que se midió en los trabajos de campo.

A continuación se representa la profundidad de muestreo del BP Chunal. Figura 5.43. El valor de la profundidad es importante, con el cual se prompone el cálculo del Volumen Potencial De Almacenamiento de Agua (VPAA)



**Figura 5.43.** Esquema del potencial volumen de almacenamiento de agua del BP Chunal escala grafica 1/11000.

En la Figura 5.43, se grafica al BP Chunal, de área aproximada de 15.84 ha, con el VWC (Tabla 4). También se muestra la profundidad (línea verde vertical), el nivel imaginario de profundidad (línea verde horizontal), la superficie 1 del bofedal (superficie de vegetación húmeda, polígono verde oscuro), la superficie 2 del bofedal (superficie de vegetación seca, polígono verde claro), y el material y agua almacenada en el interior del bofedal (polígono color gris oscuro).

De lo observado en los trabajos de campo, la profundidad de los bofedales es superior a 2m, en este trabajo se asumió el valor de 2 m. Si bien es cierto son escasos los trabajos para la medida de la profundidad de los bofedales, los trabajos de campo realizados por el proyecto Agua-Andes han observado profundidades superiores a los 5m en otros bofedales andinos. Figura.5.44



**Figura 5.44.** Trabajos de campo realizados en Ayacucho por investigadores del IRD de Francia y el proyecto Agua-Andes registran profundidades de bofedales superiores a los 5 m. Fuente, <http://www.agua-andes.com/articulos/ird-unsch-y-agua-andes-realizaron-campana-bofedales>. Fecha de adquisición 25/05/16

La Figura 5.44 muestra unas imágenes de la realización de unos trabajos de campo ejecutados por el IRD de Francia y el Proyecto Agua-Andes. En la figura se observa los trabajos que se realizaron para tomar muestras suelos inalterados de un bofedal ubicado en Ayacucho. Se obtuvieron muestras de profundidades mayores a los 5 m. y están siendo analizadas por el IRD.

## 5.8 CÁLCULO DEL VOLUMEN POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE AGUA (VPAA) DE LOS BOFEDALES

Para tener un cálculo aproximado del volumen potencial de almacenamiento de agua (VPAA) para CRCH, se usaron los resultados obtenidos en los sub capítulos anteriores.

Estos resultados del cálculo de las áreas totales de bofedales que se obtuvo para cada año, además se tiene el valor humedad del BP. Estos resultados fueron anteriormente, en el marco del desarrollo de la presente tesis. (El término VPAA ha sido creado en el presente trabajo)

### 5.8.1 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL VPAA

Para el cálculo aproximado del volumen potencial de almacenamiento de agua se asume algunas consideraciones.

- 1 Se asume que el valor contenido volumétrico de agua (VWC), hallado en la Tabla 4 sección 5.1.1, será igual para todos los bofedales para CRCH.
2. Al ser potencial, se supuso que los suelos del bofedal están saturados, el VWC se asumió constante conforme aumenta la profundidad. Pero de los trabajos de campo se ha observado que el VWC de los bofedales aumenta los conforme aumenta la profundidad hasta que se satura. Figura. 5.45. Se asumió una profundidad de 2 m de bofedal para toda la cuenca, esto bajo las observaciones de los trabajos de campo, que mostraron que a esta profundidad el VWC es superior a 0.46.



**Figura 5.45.** VWC de bofedal a 2 m de profundidad, foto modificado de:  
<http://www.agua-andes.com/articulos/investigadores-del-igp-unsch-y-agua-andes-se-reunen-campana-cabecera-cuenca-cachi>, Fecha de acceso: 25/05/16

La Figura 4.45 muestra a un bofedal que a dos metros de profundidad se observa la presencia de agua que almacena.

### 5.8.2. ECUACION DEL VPAA

Para el cálculo del VPAA, se procedió primero calcular el área superficial total de la clase bofedales, luego este valor se le multiplica por una profundidad, a este producto se le multiplica por el VWC. Ecuación 5.4. Fuente: Elaboración propia.

$$VPAA = A \times P \times VWC \quad 5.4$$

Dónde:

*A = Área total de los bofedales*

*P = Profundidad promedio de los bofedales = 2 m*

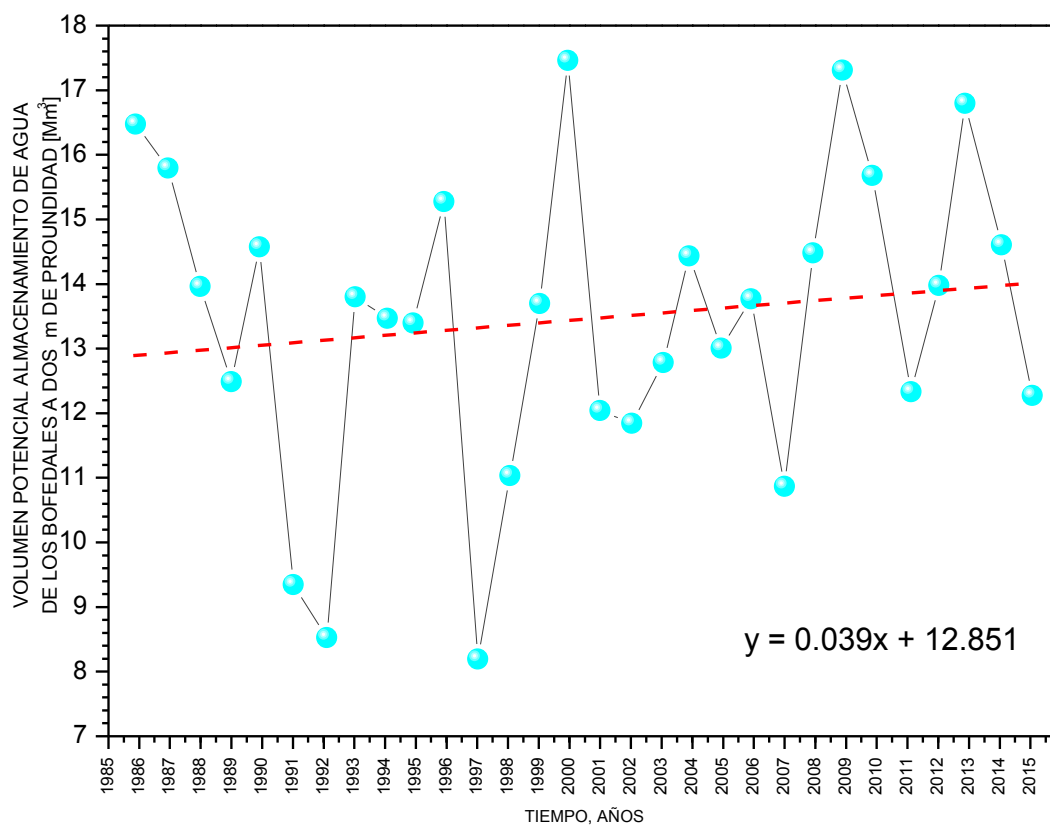
*VWC = Contenido Volumetrico de Agua = 0.46*

Para la cabecera de cuenca del río Chillón se asumió el valor obtenido en los trabajos de campo que fue para el VWC igual a 0.46, y una profundidad fija de los bofedales de 2 m así se obtendrá el volumen potencia de almacenamiento de agua.

Estas suposiciones hacen ver que el resultado que se obtenga en el cálculo real del VPAA de los bofedales probablemente sea mucho mayor a lo calculado, ya que solo se asumió una profundidad promedio de 2m. Por ello es necesario intensificar los estudios de los bofedales para conocer el verdadero volumen potencial de almacenamiento de agua.

### 5.8.3. SERIES DE TIEMPO DEL VOLUMEN POTENCIAL DE ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LOS BOFEDALES DE LA CRCH

Empleando la ecuación 5.4 se muestra en la Figura 5.46 un cálculo aproximado del VPAA en millones de metros cúbicos [ $\text{Mm}^3$ ] para CRCH, para el periodo 1986 - 2015, obteniendo un valor promedio de  $13.45 \text{ Mm}^3$  para dicho periodo. En este cálculo se ha tomado 2 m de profundidad y también se asume una profundidad constante de 2 m para todos los bofedales. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo



**Figura 5.46.** Serie de tiempo del VPAA de los bofedales CRCH, del 1986-2015

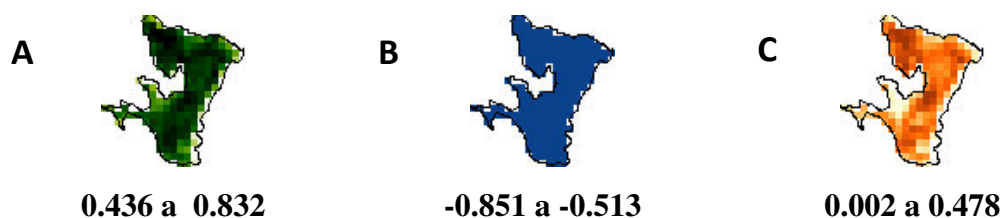
La Figura 5.46 muestra la serie de tiempo del VPAA de los bofedales de la CRCH, para los años 1986-2015, se aprecia que la variación es la misma que la variación temporal del área total de bofedales identificados ya que el VPAA, ecuación 5.4, está en función a las áreas de los bofedales.

## 5.9 DISTRIBUCIONES TEMPORALES

Seguidamente se procedió a aplicar el método IDB a las imágenes correspondientes al periodo 1986 - 2015, con el objetivo de generar mapas de distribución solo de bofedales y así analizar las variaciones de los índices IDV, IDA, IDI; tamaño de bofedal; el volumen potencial de almacenamiento de agua. A manera de presentación, se mostrara los mapas solo para el año 2014, teniendo en cuenta que también se hará lo mismo para los demás años desde 1986-2015

### 5.9.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ÍNDICES PARA EL BP CHUNAL.

Para calcular los valores de los índices del BP Chunal, IDI, IDV, y IDA del bofedal Chunal, Figura 5.47 en la cual se muestra, además, los rangos de variación de los índices para el BP Chunal.



**Figura. 5.47.** Rango de valores de los índices del BP Chunal. A) IDV. B) IDA y C) IDI. y sus rangos de variación

La Figura. 5.47 muestra los rangos de valores de los índices del BP Chunal: A) IDV, B) IDA y C) IDI. Estos rangos son los que cuantifican el bofedal Chunal. El índice más sensible es el IDI.

A continuación se presenta los valores de los índices IDV, IDA, IDI e IDB, que zonifican a un bofedal. Tabla 8.

	IDV	IDA	IDI	IDB
VALOR MINIMO	<b>0.436</b>	<b>-0851</b>	<b>0.002</b>	<b>-3.5</b>
VALOR MAXIMO	<b>0832</b>	<b>-0513</b>	<b>0.478</b>	<b>-1.15</b>

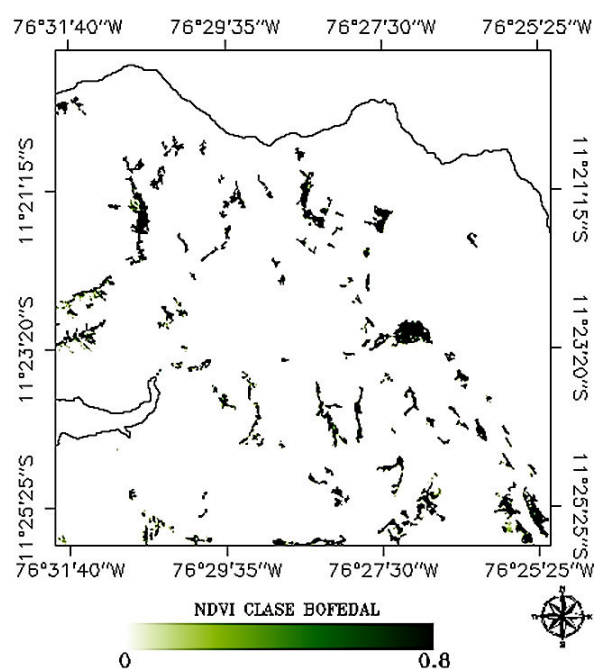
**Tabla 8.** Valores de los principales índices que zonifican a un Bofedal, IDV, IDA, IDI e IDB

## 5.9.2 DISTRIBUCION ESPACIAL DE ÍNDICES

Luego de obtener perímetros GIS en bofedales para CRCH, utilizamos este perímetro para generar el IDI, IDV, y IDA de las zonas clasificadas como bofedales, para ello, se utilizó el perímetro de bofedales generado por el método “endmember”, así se muestra con más detalle los valores de los índices que están presente en los bofedales. Los datos de los valores de los índices se encuentran en el Anexo digital Archivo

### 5.9.2.1 MINIMO, MAXIMO Y PROMEDIO DEL IDV EN BOFEDALES

Con el perímetro GIS de bofedales para el 5 de julio del 2014, se realizó el IDV de los bofedales. De este mapa, se obtuvieron los siguientes valores IDV de bofedal, el valor 0.436, a 0.832 con media 0.602. Figura 5.48



**Figura 5.48.** IDV de bofedales

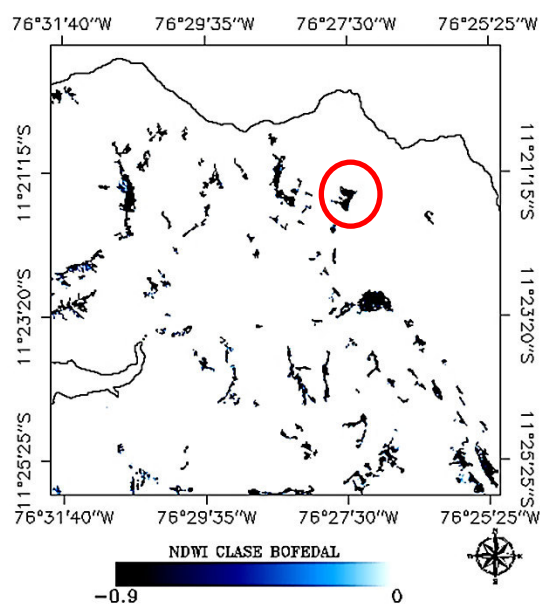
En la Figura 5.48 muestra el mapa IDV de bofedales cercanos (zona BP Chunal) se observa que los bofedales presentan tonalidades de color verde, de las observaciones en el programa informático Google Earth se puede afirmar que en verde mayor IDV, mayor



saludable la vegetación del bofedal, caso contrario mientras más claro es el verde representa zonas de bofedales con vegetación poco saludables, o probablemente bofedales secos.

### 5.9.2.2 MINIMO, MAXIMO Y PROMEDIO DEL IDA EN BOFEDALES

Con la generación del perímetro GIS de bofedales para la fecha 4 de julio del 2014 de realizo el IDA de los bofedales. En este mapa se obtuvieron los siguientes valores IDA de todos que corresponden a bofedales, (-0.851, hasta: -0.513 con media: -0.672, Figura 5.49

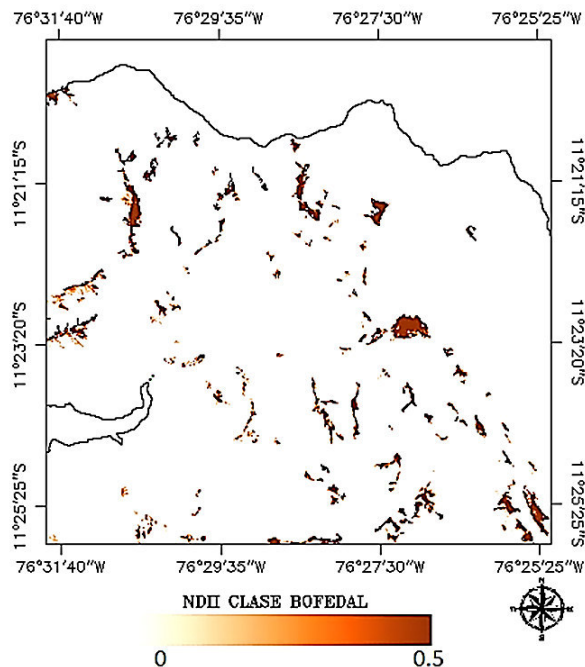


**Figura. 5.49.** IDA de bofedales

Figura 5.49 muestra el IDA de bofedales cercanos (zona del BP Chunal (círculo rojo)). Los bofedales presentan áreas de tonalidades de color azul. Mientras más oscuro es el azul disminuye el valor del IDA. Este índice indica la humedad del suelo, pero como los bofedales que distinguen los rangos de IDA. De las observaciones en los trabajos de campo y en el programa informático Google Earth, se puede decir que mientras más oscuro es el azul es más saludable la vegetación del bofedal, caso contrario mientras más claro es el azul representa zonas de bofedales con vegetación poco saludables, o probablemente bofedales secos.

### 5.9.2.3 MINIMO, MAXIMO Y PROMEDIO DEL IDI EN BOFEDALES

Con la generación del perímetro GIS de bofedales para la fecha 4 de julio del 2014 de realizo un IDI en bofedales. Con este mapa se obtuvieron los siguientes valores IDI de todos los puntos que corresponden a bofedales, desde 0.003, hasta: 0.479 con media: 0.158. Figura 5.50.

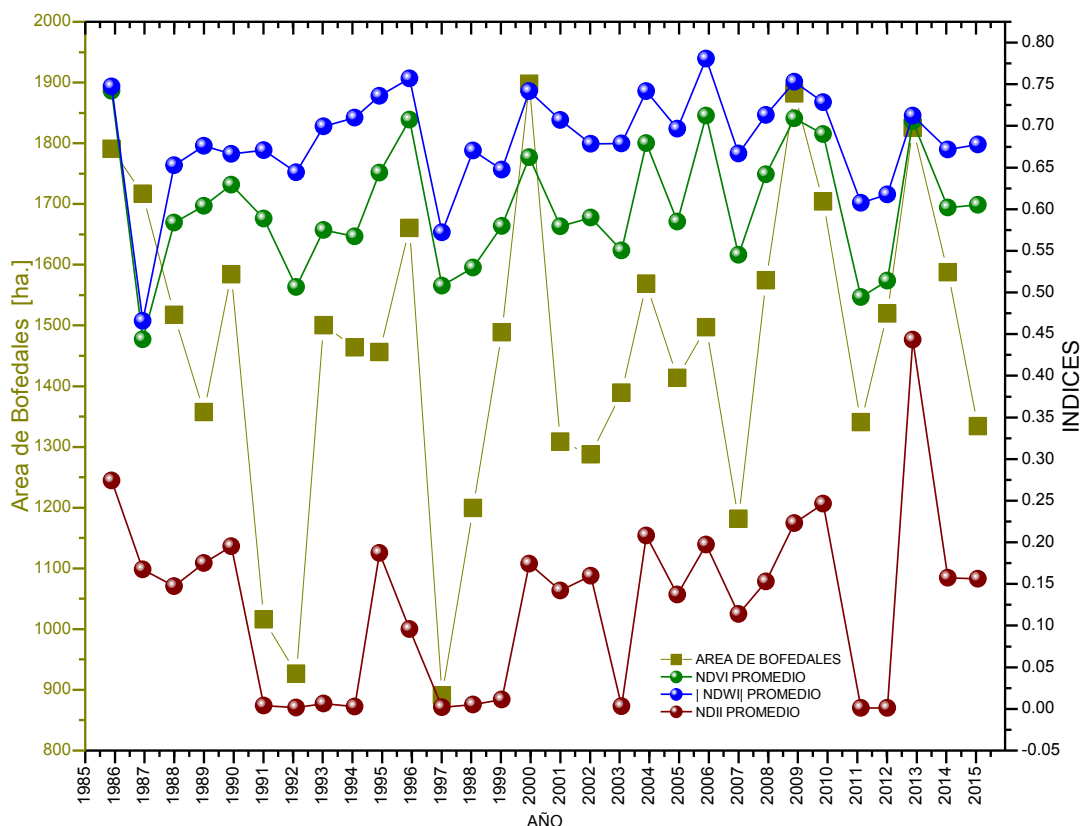


**Figura. 5.50.** IDI de bofedales

En la Figura 5.50 observamos el IDI en bofedales cercanos a la zona del BP Chuanl. Los bofedales presentan tonalidades de marrón, de las observaciones en el programa informático Google Earth mas marron, aumenta mayor IDI, es más saludable, caso contrario, mientas menos marrón, representa zonas de bofedales con vegetación poco saludables, o probablemente bofedales secos.

### 5.9.3 VARIACIÓN TEMPORAL DEL AREA LOS BOFEDALES Y LOS ÍNDICES

Para observar la variación temporal de los valores de las áreas y los índices IDI, IDV, IDA que corresponden a bofedales mapeados para CRCH, se han trabajaron 30 imágenes de la misma escena correspondiente al periodo 1986-2015, una imagen por año. Estas imágenes pertenecen a una misma estación del año. Figura 5.51. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo.



**Figura 5.51.** Serie de tiempo de las área los bofedales y los índices IDV, IDA, IDI para el periodo 1986-2015.

En la Figura 5.51, se muestra las series de tiempo de las áreas totales de bofedales (en color verde cactus), del valor promedio de índices IDV (en color verde), valor absoluto IDA (azul), y IDI (en color guinda) en bofedales para CRCH. Las superficies de bofedales, el IDV y el IDA presentan comportamientos similares, con algunos años con valores mínimos resaltantes (1987, 1997), que probablemente sea a causa de fenómenos como El Niño o La Niña. Para IDI el comportamiento es diferente que los índices anteriores, con marcados periodos en la cual este índice tiene valores mínimos en años consecutivos (1991-

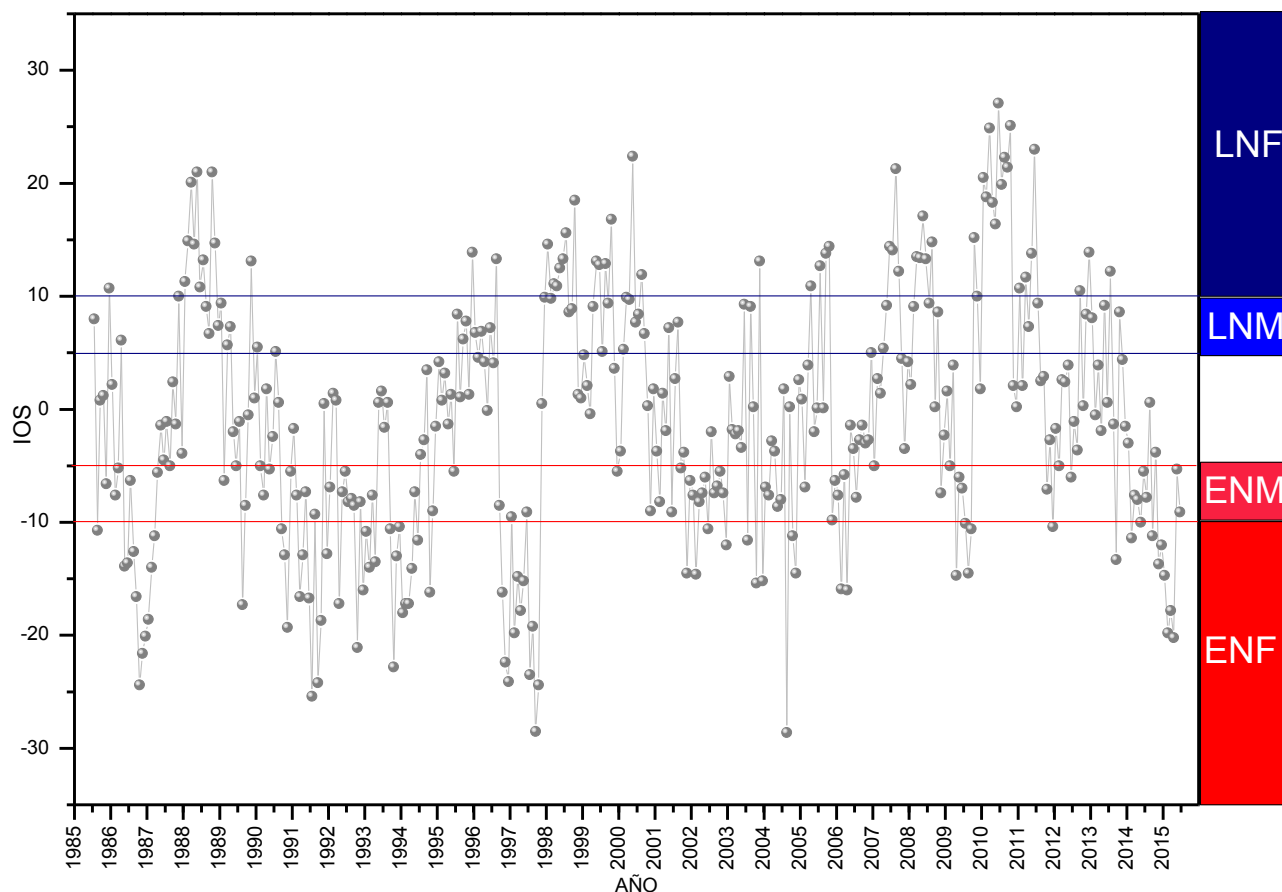
1994, 1997-1999), esto probablemente a que este índices sea más sensible a los eventos extremos Niño Niña.

Una comparación más detallada entre el comportamiento de los índices a causa de los fenómenos extremo, Niño y Niña se darán líneas más abajo

Los registros históricos de los eventos: El Niño y La Niña fueron consultados del siguiente portal: <http://ggweather.com/enso/oni.htm> Fecha de acceso: 12/09/2016

### **5.10 ANALISIS CON EL ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR (IOS)**

Este valor es un indicador, Figura 5.52, de la diferencia de presión atmosférica entre Tahití (Lat: 12.4 S, Long: 130.9 E) y Darwin ( Lat: 17.55 S, Long: 14.6 W) . (Xu et al., 2004)  
Lavado y Espinoza (2014)



**Figura 5.52.** Evolución del IOS para el periodo 1986-2015. Fuente: Datos de la página web:

[www.bom.gov.au/climate/current/soihtml1.shtml](http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtml1.shtml). Fecha de acceso: 15/09/2016

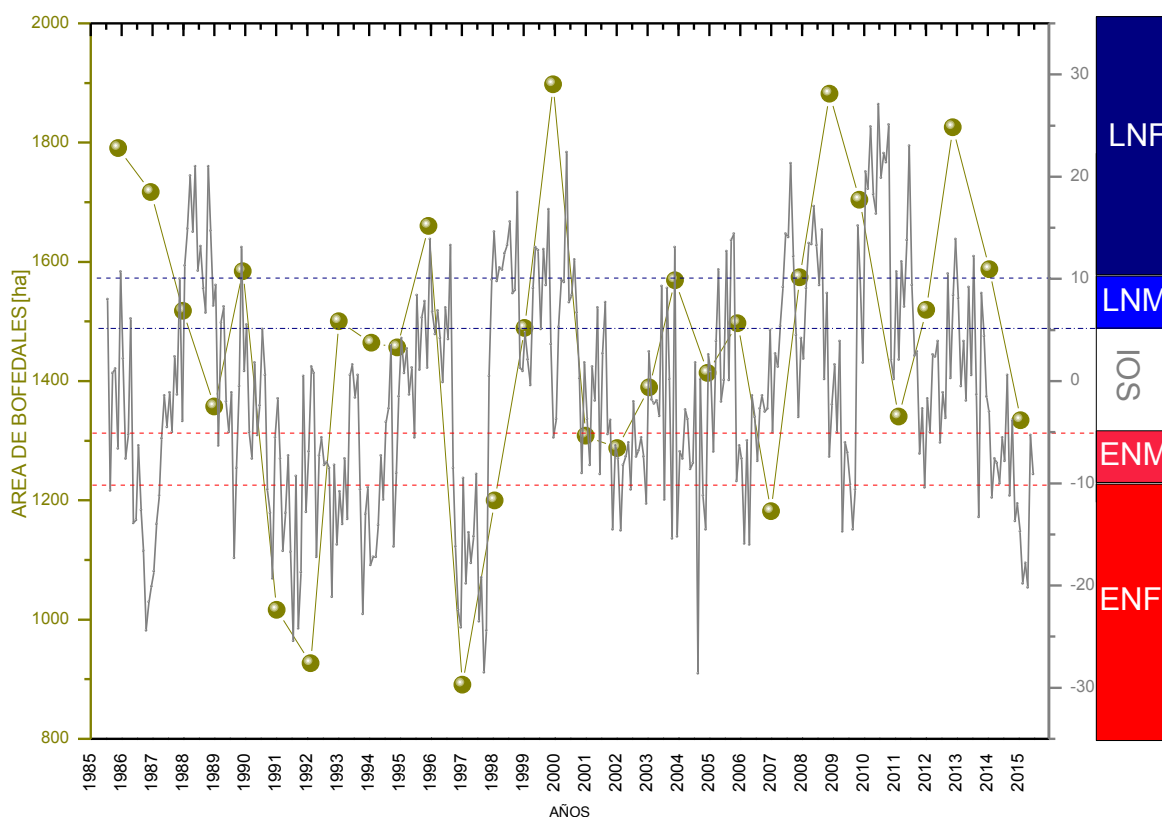
La Figura 5.52, muestra la evolución temporal del IOS desde el año 1986-2015. En la margen derecha la escala delimita los rangos para las ocurrencias de los años con fenómenos ENF, ENM, LNF, LNM.

### 5.10. 1 IOS Y LOS RESULTADOS PARA CRCH

A continuación se presentan las gráficas del IOS con los resultados obtenidos para la cuenca del río Chillón, gráficas simultáneas entre el IOS y el VPAA las áreas de los bofedales en función del tiempo, y el IOS con el IDV, IDA, y IDI, en función del tiempo.

### 5.10.2 IOS y ÁREA DE BOFEDALES, VPAA EN FUNCIÓN AL TIEMPO

Con la finalidad de observar la variabilidad de las áreas de los bofedales respecto a la variación del IOS se realizó la gráfica que superpone estos valores, Figura 5.53. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo



**Figura 5.53.** Serie de tiempo del IOS (línea gris) y área de bofedales (verde cactus) CRCH del 1986 al 2015.

La Figura 5.53 muestra el comportamiento de la serie de tiempo del IOS, gris, y de las áreas de los bofedales, color verde cactus. Se muestra principalmente que mientras se desarrolla o se presenta el fenómeno de la ENF las áreas de los bofedales decaen, para los años 1991, 1992, 1997, y cuando se presentan fenómenos de LNF y LNM las áreas de los bofedales aumentan 1999, 2000. Cabe resaltar que primero ocurre la disminución o aumento del IOS, Fenómeno El Niño o la Niña y como respuesta a este fenómeno se incrementa la variación de las áreas de los bofedales, teniendo un desfase de unos meses en promedio. De forma similar ocurre el comportamiento del IOS y VPAA en función al tiempo, ya que el VPAA está en función del comportamiento de las áreas de los bofedales.

### 5.10.3. SERIE DE TIEMPO DEL IOS y EL IDV, IDA, IDI PROMEDIO DE BOFEDALES

Para observar la variabilidad de los valores promedio de los IDV, IDA y IDI de la clase bofedal con respecto a la variación del IOS de realizo una la gráfica que superpone estos cuatro valores en el periodo 1986-2015, Figura 5.54. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo

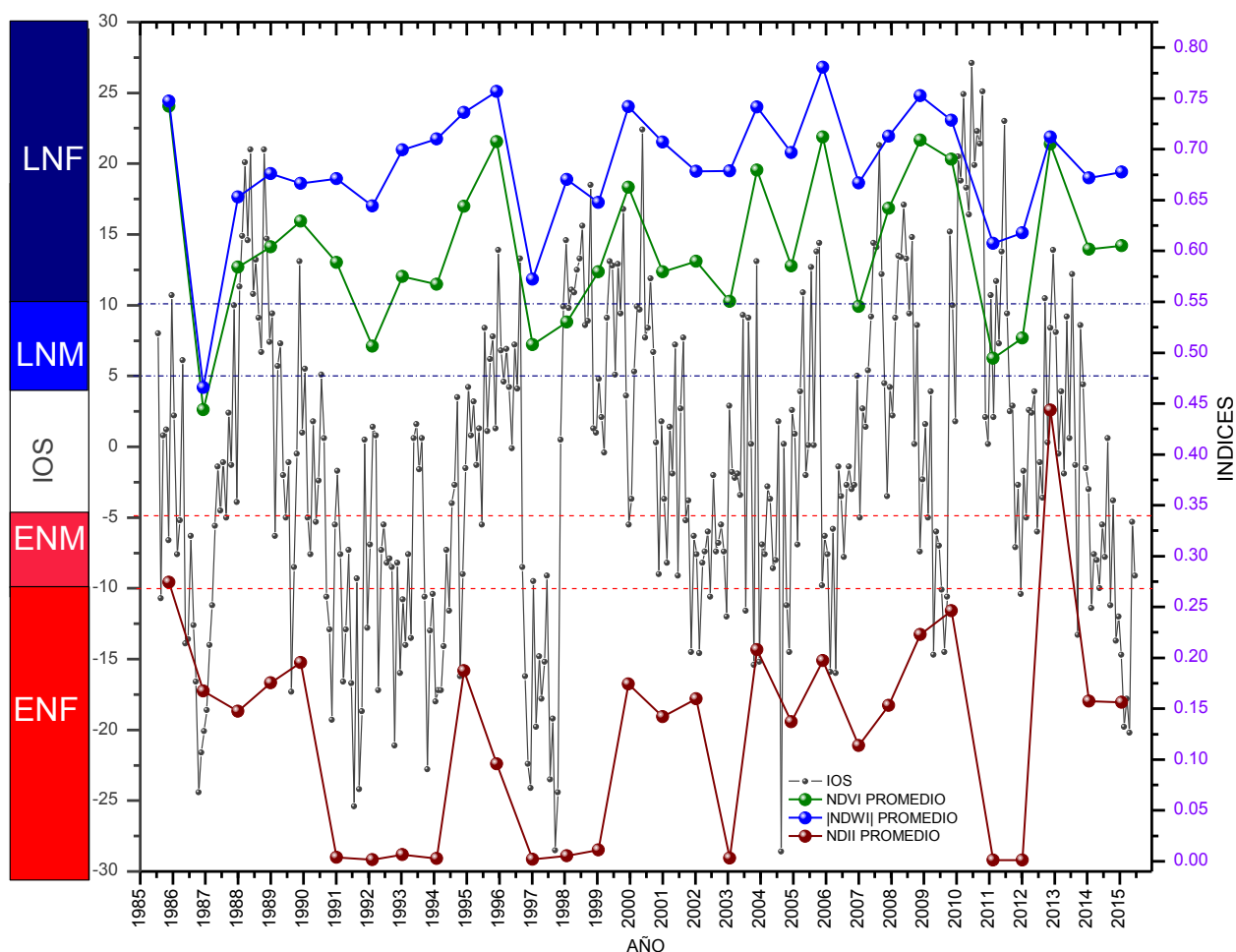


Figura 5.54. Serie de tiempo del IOS y medias de IDV, IDA, IDI para los años 1986-2015

La Figura 5.54 muestra el comportamiento de la serie de tiempo del IOS, de datos mensuales (en color gris) y del valor promedio de los índices: IDV (en color verde), valor absoluto del IDA (el valor absoluto es para tener todos los rangos en positivo, ya que solo

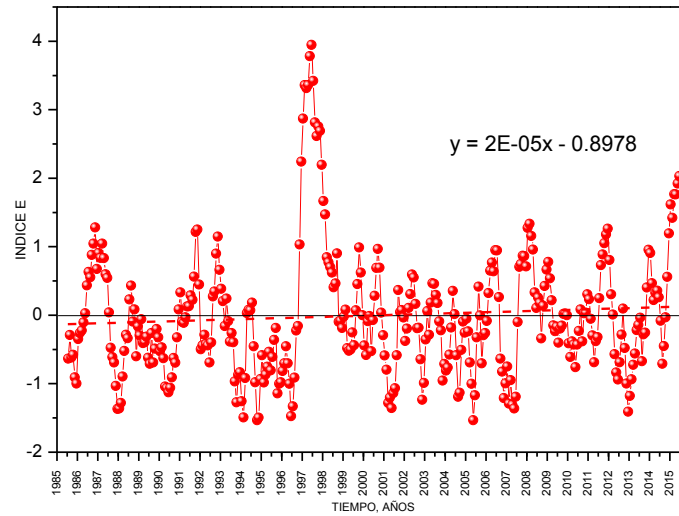
cambiara la dirección de comportamiento y no la respuesta entre el IOS y el IDA, en color azul) y del valor del IDI (en color guinda) de los bofedales. Para el IDV se observa principalmente que en los años que se presenta el fenómeno de la ENF el valor del IDV decae, para los años 1987, 1991, 1992, 1997, 1998, y cuando se presentan años con fenómenos de LNF o LNM el valor de IDV aumentan 1988, 1999, 2000. Para el IDA se aprecia que en los años con ocurrencia del fenómeno de ENF el valor del IDA decae, para los años 1987, 1992, 1997 y cuando se presentan años con fenómenos de LNF o LNM el valor del IDA aumenta 1988, 1999, 2000. Para el IDI se observa que en los años con ocurrencia del fenómeno de ENF, y ENM el valor del IDI decae, para los años 1987, 1991, 1992, 1993, 1994, 1997, 1998, 2004. Para los años con fenómenos de LNF o LNM, 2011, 2012, el valor del IDI decae. Se observa que en estos periodos es más prolongado el tiempo de recuperación del índice, esto indica que este índice es más sensible a estos fenómenos.

Cabe resaltar que primero ocurre la disminución o aumento del IOS, El Niño o la Niña, y en respuesta a este fenómeno se presenta una marcada variación del valor promedio del IDV, IDA y IDI de bofedales

### **5.11 LOS BOFEDALES Y LOS INDICE C e INDICE E**

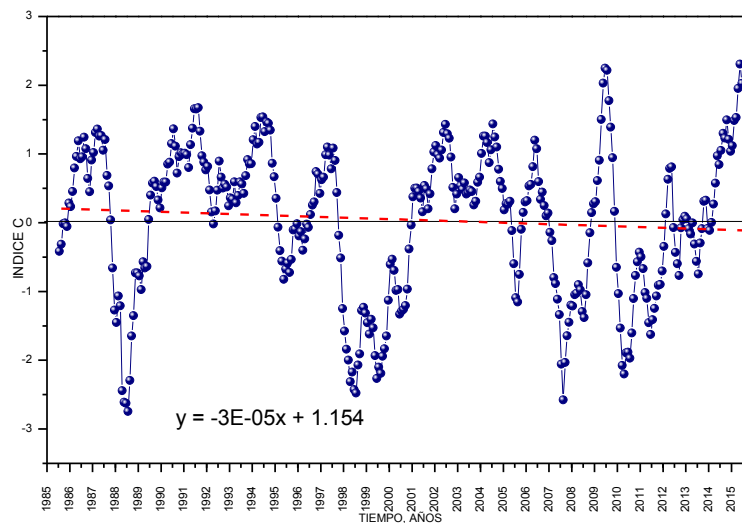
Los índices E y C son índices oceánicos para ver el ENSO (Takahashi et al., 2011) (de coordenadas: 0-10 S, 90 W- 80W), índice E, Figura 5.55, y en la región del Pacífico central (de coordenadas: 5 N-5 S, 170 W-120 W), índice C Figura 5.56. Los resultados de los trabajos de Lavado y Espinoza (2014) muestran la relación del ENSO con la precipitación en diferentes zonas, + E es para eventos de El Niño, y los valores negativos del índice C a eventos La Niña. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo





**Figura 5.55** Índice E para el periodo 1986 al 2015

La Figura 5.55 muestra el comportamiento del índice E para el periodo 1986-2015,



**Figuras 5.56.** Índice C para el periodo 1986-2015.

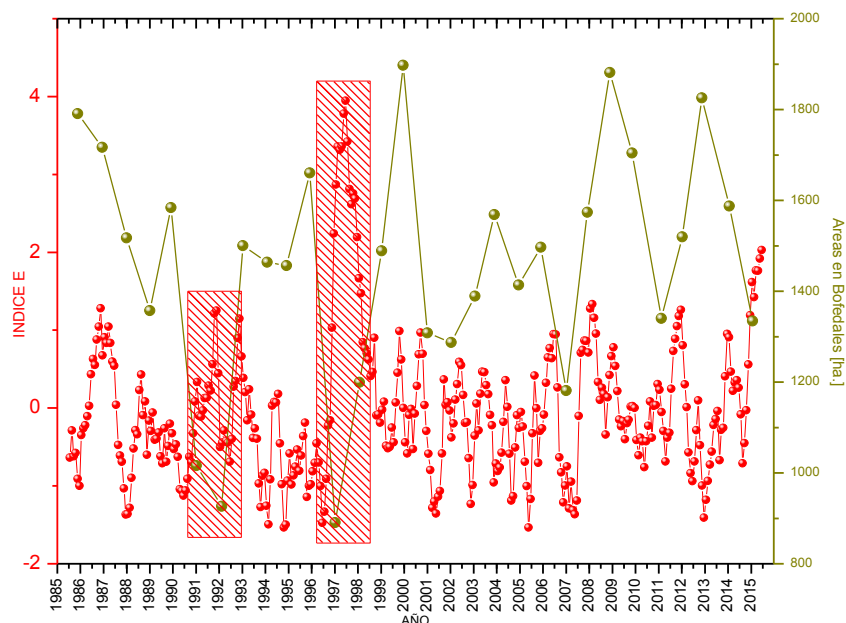
La Figura 5.56 muestra el comportamiento del índice C para el periodo 1986-2015

### 5.11.1 SERIES DE TIEMPO DE LOS INDICES E Y C CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS, CRCH

Seguidamente se realizaron graficas superponiendo los índices E y C (Pacífico este y central respectivamente) (Takahashi et al., 2011) con los resultados obtenidos para CRCH: se graficaron los índices E y C con las áreas de los bofedales en función del tiempo, también se realizara las gráficas los índices E y C con el IDV, IDA y IDI, en función del tiempo para el periodo 1986 - 2015.

#### 5.11.1.1 SERIE DE TIEMPO DEL INDICE E y ÁREA DE BOFEDALES EN FUNCIÓN AL TIEMPO

Con la finalidad de observa la variabilidad de las áreas de los bofedaes respecto a la serie del índice E se realizó la gráfica que superpone estos valores, Figura 5.57. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo



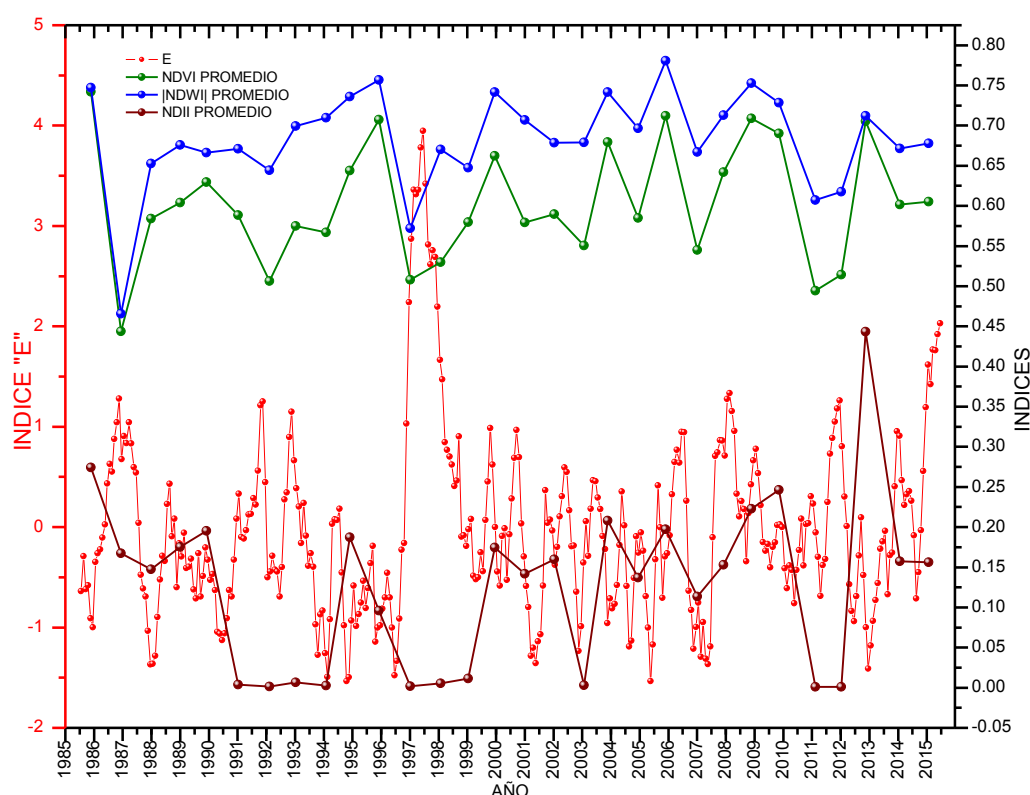
**Figura 5.57.** Serie de tiempo del Índice E y bofedales para CRCH (1986-2015).

La Figura 5.57 muestra el comportamiento de la series de tiempo del Índice E, de datos mensuales (color rojo) y de las áreas de los bofedales, color verde cactus. También muestra que para valores positivos del Índice E las áreas de los bofedales decaen significativamente,

para los años 1991, 1992, 1997, 1998. Cabe resaltar que primero ocurre el aumento del índice, luego como respuesta a este fenómeno varían las áreas de los bofedales. Este mismo comportamiento tiene el VPAA con el índice E

### 5.11.1.2 RELACIÓN DE INDICE E CON LOS INDICES IDV, IDA, IDI

Para analizar el valor promedio en IDV valor absoluto del IDA y el IDI en CRCH, comparada con índice E; se realizó una gráfica que muestra simultáneamente, a diferente escala, la dinámica del índice E y el estos índices en función al tiempo para el periodo 1986-2015. Figura, 5.58. Los datos se encuentran en el Anexo Archivo



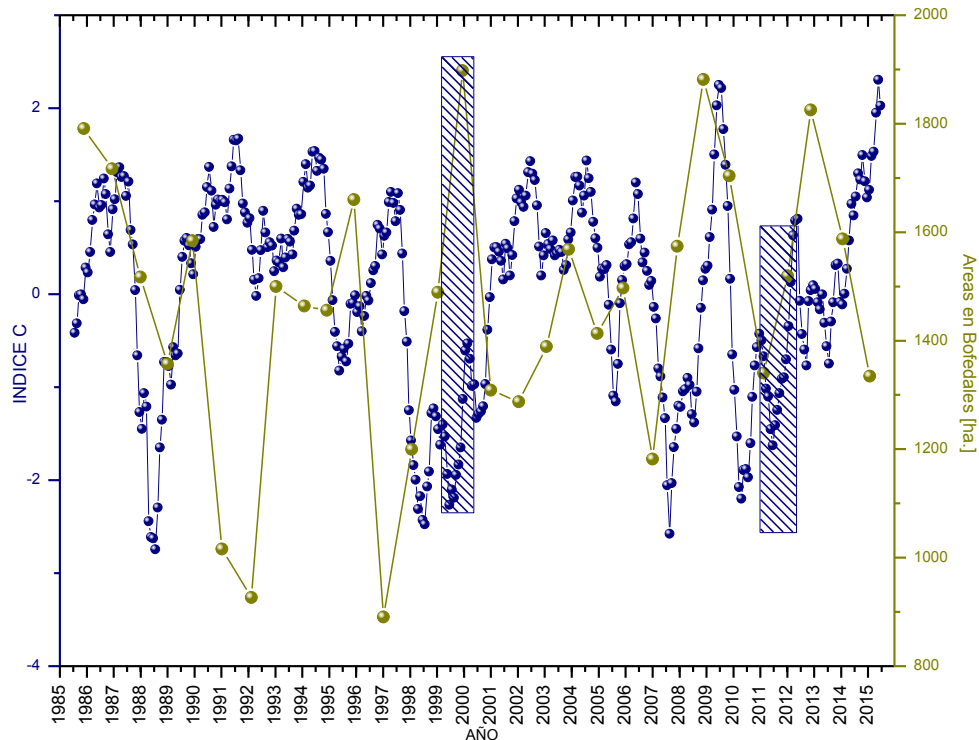
**Figura 5.58.** Serie de tiempo del índice E y el promedio de los índices IDV, IDA y IDI de los bofedales CRCH, del 1986 al 2015.

La Figura. 5.58 muestra el comportamiento de las series de tiempo del índice E (en color rojo) y el comportamiento del promedio de los índices IDV (en color verde), IDA (en color azul) y del IDI (en color guinda) de los bofedales, también muestra que en años donde se presentó el fenómeno de El Niño 1997-1998, índice E positivos. En algunos años el índice IDV disminuye su valor, es el caso para los años 1992, 1997, 1998, 2011 años en que se reportaron fenómenos de El Niño; también se muestra que en otros años con fenómeno de

El Niño el valor del IDV no disminuyo, es el caso para los años 1993, 1994, 1995, 2002, 2003, 2004, 2006, 2009, años donde se fueron reportados como Niño débil. Para el IDA promedio de los bofedales muestra que en los años donde se presenta el fenómeno de El Niño, índice E positivos, el valor absoluto del IDA promedio disminuye años 1987, ENM y 1992, 1997 estos años se reportaron Fenómenos de El Niño fuerte. También se muestra que en otros años con fenómeno de El Niño el valor absoluto del IDA promedio no disminuyo, es el caso para los años 1988,1993, 1994, 1995, 2004, 2006, 2009, y años en los que disminuyó ligeramente después de un evento Niño es el caso 2004-2005, 2006-2007, y se mantuvo casi constante en el 2002, estos años fueron reportados ENM. Para el IDI en años donde se presenta el fenómeno de El niño, índice E positivos, en algunos años el índice IDI disminuye, años 1991-1992, 1997-1998, para el año 2015 el valor del se mantiene casi constante, estos años se reportaron fenómenos de ENF, el IDI bajo para el 2003 año con ENM. También observamos que años con fenómeno de El Niño el valor del IDI disminuye ligeramente, es el caso para los años 1987, 1995, 2005, 2007, y mantuvo un valor bajo en los años 1993-1994, estos años fueron reportados como ENM.

#### **5.11.1.3. INDICE C y ÁREA DE BOFEDALES EN FUNCIÓN AL TIEMPO**

Con la finalidad de observa la variabilidad de las áreas de los bofedales respecto al índice C, de datos mensuales, se realizó la gráfica que superpone estos valores, Figura 5.59. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo

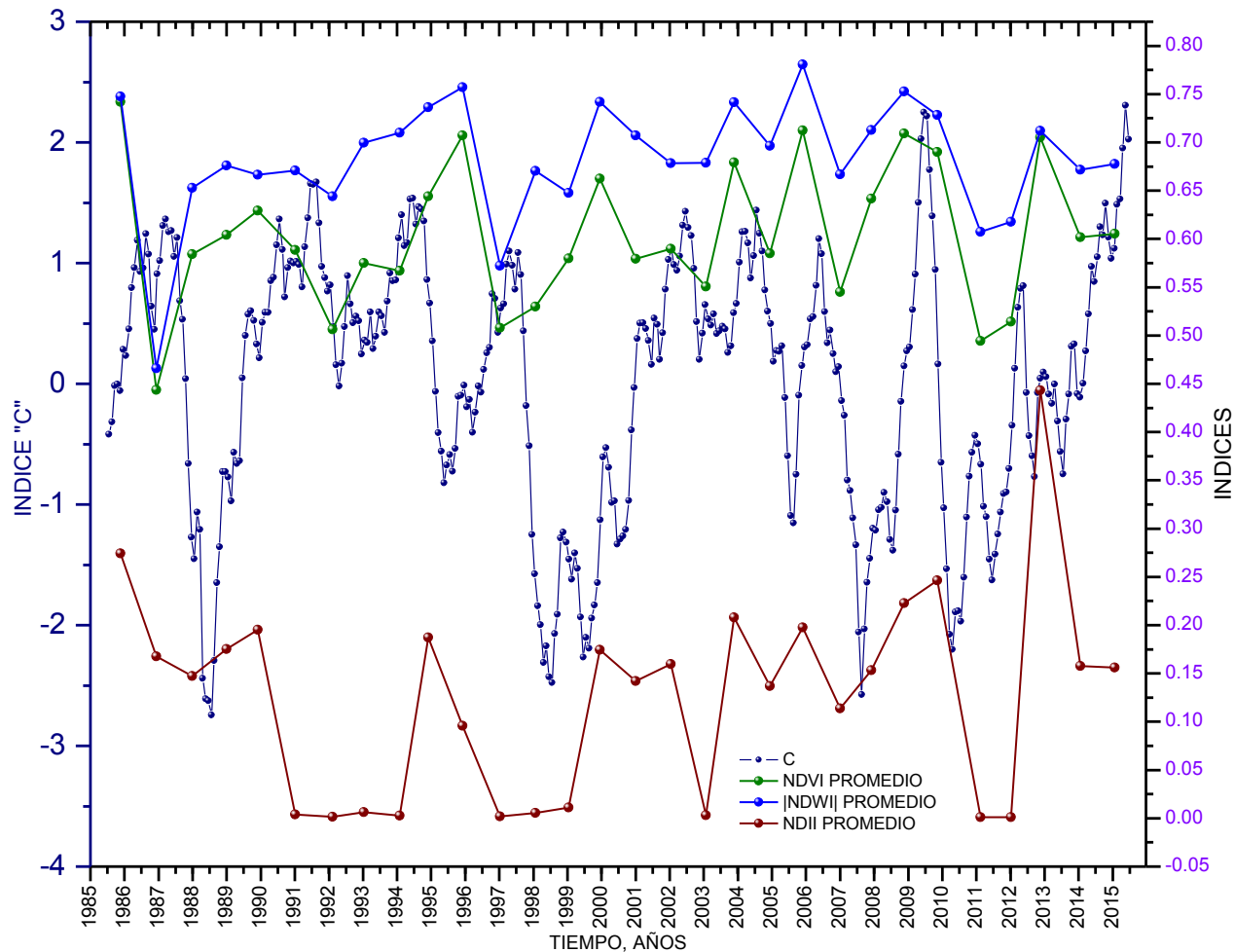


**Figura 5.59.** Serie de tiempo del Índice C y extensión de bofedales de CRCH para el periodo 1986-2015.

La Figura 5.59 muestra el comportamiento de la serie de tiempo del Índice C, color azul oscuro, y de las áreas de los bofedales, color verde cactus. La muestra principalmente que para algunos valores negativos del Índice C (La Niña) las áreas de los bofedales se incrementan esto en los años 1999, 2000, 2012. Este mismo comportamiento presenta el VPAA con el índice C

### 5.11.2 RELACIÓN DE ÍNDICE C CON LOS ÍNDICES IDV, IDA, IDI

Para analizar el valor promedio del IDV, valor absoluto del IDA y IDI en CRCH, comparada el índice C; se realizó una gráfica que muestra simultáneamente, a diferente escala, la variación temporal del índice C y los índices IDV, valor absoluto del IDA y IDI en función del tiempo para el periodo 1986 - 2015. Figura 5.60. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo



**Figura 5.60.** Serie de tiempo del índice C y el promedio de los índices IDV, IDA y IDI de bofedales de CRCH del 1986-2015

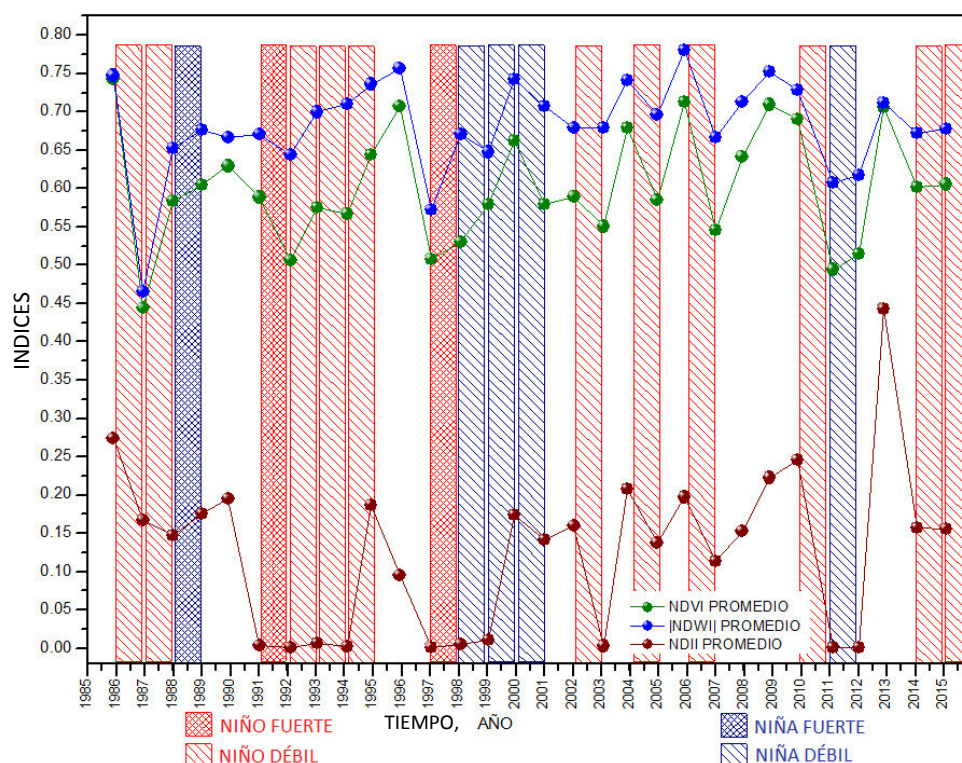
La Figura 5.60 muestra el comportamiento de las series de tiempo del índice C (en color azul oscuro) y del promedio de los índices IDV (en color verde), IDA (en color azul) y el IDI (en color guinda) de los bofedales. Para el NVDI, mientras se desarrolla o se presenta el Fenómeno de La Niña, índice C negativos, el índice IDV se recupera aumentado su valor, es el caso de los años 1988-1989, 1998-1999-2000, 2007-2008, 2011-2012. Para el IDA, mientras se desarrolla o se presenta el Fenómeno de La Niña, índice C negativos, el valor absoluto del IDA promedio de bofedales se recupera aumentado su valor, es el caso para los años 1988-1989, 1999-2000, 2008-2009, 2011-2012.

Para el IDI, mientras se desarrolla o se presenta el Fenómeno de La Niña, índice negativos, el índice IDI se recupera aumentado su valor, es el caso para los años 1988-1989, 2000,

2011, aunque para este caso el aumento del valor del IDI es menor comparada con los dos casos anteriores y es casi constante para el periodo 2011-2012.

En el Anexo G se adjuntan algunas imágenes complementarias.

Con la finalidad de observar el comportamiento del valor promedio de los índices IDV, valor absoluto del IDA y el IDI de los bofedales con los eventos El Niño y La Niña se realizó una serie de tiempo que superpone estos eventos con la evolución de los índices, para el periodo 1986 - 2015. Figura 5.61



**Figura 5.61.** Serie de tiempo de los fenómenos Niño y Niña y del promedio Índices IDV (en color verde), IDA (en color azul) y el IDI (en color guinda) de bofedales para CRCH del 1986 al 2015.

La Figura 5.61 muestra en barras rojas los eventos El Niños (el achurado simple corresponde a El Niño débil, y el doble corresponde a El Niño fuerte) en barras azul oscuro los eventos La Niña (el achurado simple corresponde a Niña débil, y el doble corresponde a Niña fuerte). También muestra los valores del promedio de los índices IDV (en color verde) valor absoluto del IDA (en color azul) y el IDI en bofedales para CRCH, se observa que el valor de los índices es afectado por la ocurrencia de fenómenos Niño o Niña, ya que

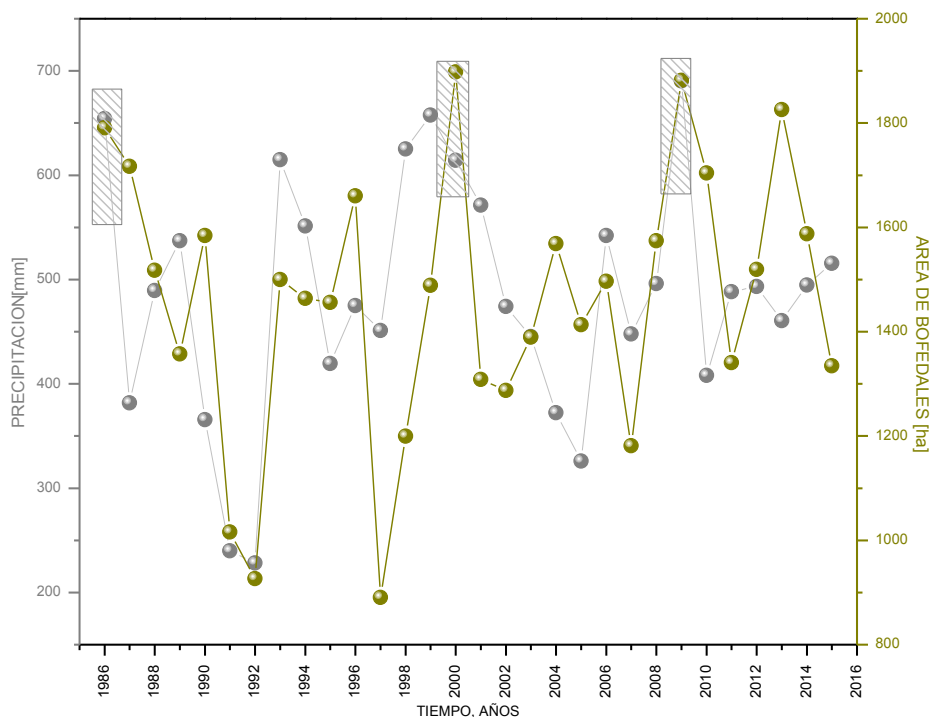


estos índices sufren una variación notoria. Además el IDI de los bofedales es más sensible tras la ocurrencia de un evento El Niño, esto se aprecia en los años 1991, 1992, 1993, 1994, y 1995, que tras la ocurrencia de eventos Niños este índice tarda en recuperar su valor, lo mismo sucede para los años con eventos El Niño fuerte, La Niña 1997-1998, 1999 y para el 2011- 2012 con evento La Niña

## 5.12. ÁREAS DE LOS BOFEDALES Y PRECIPITACIÓN, VPAA

Para ver detalles del cálculo, precipitación, CRCH periodo 1986 - 2015 se encuentran en el Anexo F

Para observa el comportamiento de las áreas de los bofedales frente a la precipitación en CRCH, se realizó una gráfica que muestra en forma simultánea, a diferente escala estos valores en el periodo 1986 - 2015, Figura 5.62. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo



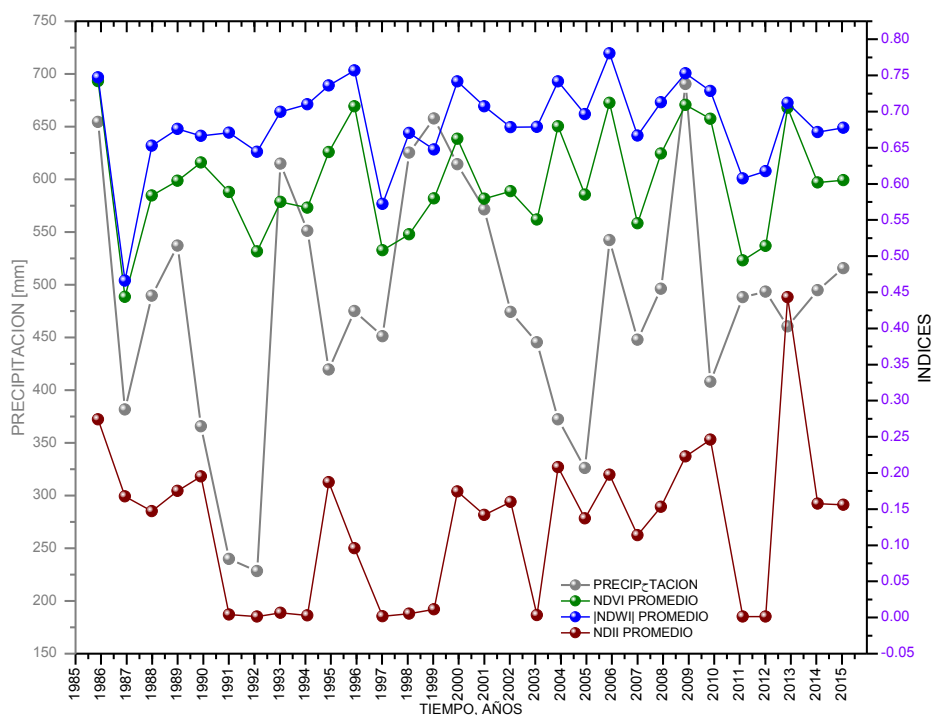
**Figura.5.62.** Serie de tiempo para la Precipitación (plomo) y área (verde cactus) de bofedales para CRCH del 1986 al 2015.

La Figura 5.62 muestra, de manera general, la precipitación, en color plomo, y el total de las áreas de bofedales, color verde cactus, estas presentan comportamientos similares

cuando existe valores altos de precipitación se aprecia luego un incremento de las ares de los bofedales 1986, 2000, 2009, también existe años en que aunque la precipitación disminuye las áreas de bofedales no disminuyen tan rápidamente 1993, 1994, 1995, pero existen años en las que las precipitaciones fueron muy bajas y también las áreas de los bofedales registraron valores muy bajos esto en los años 1991, 1992 años en los que se reporta la ocurrencia del fenómeno El Niño. De forma análoga existe similar comportamiento entre la precipitación y el VPAA.

### 5.12.1. COMPORTAMIENTO DE LOS ÍNDICES Y LA PRECIPITACIÓN

Para analizar el valor promedio del IDV, valor absoluto del IDA y el IDI de los bofedales, comparada con la cantidad de precipitación anual en CRCH; la gráfica, serie de tiempo, muestra simultáneamente, a diferente escala, la variación temporal de la precipitación y el valor de estos índices para el periodo 1986 - 2015, Figura 5.63. Los datos se encuentran en el Anexo digital Archivo.



**Figura 5.63.** Serie de tiempo de la precipitación y el promedio de los índices IDV, IDA y IDI de bofedales para CRCH del 1986 al 2015.

La Figura 5.63, muestra el comportamiento de las series de tiempo de la precipitación, (en color plomo), con las series de tiempo promedio del IDV (en color verde) IDA (en color azul) y IDI (color guinda) de los bofedales. Para el IDV observamos que en la mayoría de años, mientras sube la precipitación, también sube el valor promedio de IDV y viceversa, en los años 1987, 1992, 1997 1998, 2007, 2011, 2012, años en los que se presentaron fenómenos el Niño en Perú. Existen años en la que este comportamiento es opuesto, es decir cuando baja la precipitación, el valor del IDV promedio aumenta (1990, 1995, 2000, 2002, 2004, 2013), y años en que cuando la precipitación aumenta el NDV disminuye (2011, 2014)

Para el IDA, mientras sube la precipitación, también sube el valor absoluto del IDA y viceversa, para los años 1987 1997 1998, 2011, 2012 años en los que se presentaron fenómenos Niño, Niña en Perú. Existen años en la que este comportamiento es opuesto, cuando baja la precipitación, el valor absoluto del IDA promedio aumenta (1991, 1994, 1995, 2000, 2004, 2013) y años en que cuando la precipitación aumenta el valor absoluto del IDA promedio disminuye (1999, 2011, 2014).

Para el IDI de la misma manera se observa que mientras aumente la precipitación, también aumente el valor promedio de IDI y viceversa, se puede resaltar los años 1987,

1991,1992, 1997,1998 1999, 2007, 2012 (eventos Niños), 2011 (evento Niña). Pero existen años en la que este comportamiento es opuesto, es decir cuando baja la precipitación, el valor del IDI promedio aumenta (1990, 1995, 200, 2002, 2004, 2010,2013), y años en que cuando la precipitación aumenta el IDI disminuye (1988, 1996, 2011, 2014)

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES

Los estudios de campo resaltan el marcado contraste entre las propiedades de la cobertura de los ecosistemas de bofedales frente a las demás áreas. Este contraste es, a su vez, reflejado en las propiedades reflectivas de las coberturas, lo que permite su diferenciación a partir del análisis de imágenes de satélites.

Se determinaron los parámetros biofísicos encontradas del BP

Para la efectividad del método “endmember” es muy importante la correcta elección del “endmember” bofedal, ya que la aplicación del LSU se basa en la correcta elección de los “endmember”s, es decir, se debe elegir un punto representativo del bofedal. La fracción de “endmember” bofedal para la cuenca alta del río Chillón tiene un rango de 0.45 a 1,

Cualitativamente índices IDV, IDA, IDI, individualmente pueden determinar los bofedales.

Una imagen Red (IDI), Green (IDV) y Blue (IDA), determina visualmente los bofedales

Para incluir la característica topográfica fue necesario el uso un perímetro GIS de pendientes de 0 a 15, generado por el DEM y aplicado a la clasificación paralelepípedos

Se determinó los umbrales de IDV, IDA, IDI que presentan los bofedales

El índice que representa mejor la fracción de “endmember” bofedal fue el IDI, mostrando una alta correlación con la fracción de bofedal del método “*endmember*”.

Basado en los resultados anteriores y haciendo una relación adecuada entre el IDI y el IDA se puede zonificar de manera directa a los bofedales.

El índice de bofedal, IDB, propuesto mapea de forma directa a los bofedales, sin la necesidad de calcular la fracción “endmember” de bofedal, no será necesario calcular IDV, IDA, IDI, ni realizar clasificación supervisada, solo se necesitará relacionar tres bandas del sensor Landsat. Mostrando ser una forma bastante efectiva u eficiente de mapeo de bofedales.

Tanto el método “endmember”, método índice y el IDB se aplicó a la cuenca del río Chillón, pero también se han aplicado a otros lugares obteniendo buenos resultados, estos resultados se encuentran disponibles en: <http://www.agua-andes.com>. Fecha de acceso: 30/05/16

Se concluye que las bandas de los satélites Landsat más sensibles para la teledetección de bofedales son:  $\rho_{\text{GREEN}}$ ,  $\rho_{\text{NIR}}$ ,  $\rho_{\text{SWIR}}$

El IDV, IDA, IDI y cambian en los años 1986 - 2015

El VPAA fue un cálculo que se realizó basado en el área de bofedales, la profundidad (los primeros 2 m) y el valor del VWC, el volumen estimado fue de  $13.4 \text{ Mm}^3$  en promedio para todo el periodo estudiado

Los índices IDV, IDA y IDI en bofedales son sensibles a las variaciones estacionales extremas El Niño/ La Niña, mostrado en las gráficas entre estos índices (IDV, IDA y IDI) y el IOS, Índice C, E, estos índices sufren una variación en sus valores luego de la ocurrencia de los eventos: El Niño la Niña; siendo, aparentemente, más sensible el IDI

Según lo mostrado en las gráficas del Índice E, las áreas de bofedales y los índices IDV, IDA y IDI en bofedales son sensibles a de eventos El Niño.

Según lo observado en las gráficas del Índice C las areas de bofedales y los índices IDV, IDA y IDI en bofedales son sensibles a eventos La Niña.

Se concluye que se cumplió con los objetivos planteados en la tesis, se ha utilizado las tres metodologías (método “endmember”, método Indices, método IDB) de las cuales fue la metodología IDB la concluyente.



## RECOMENDACIONES

Se recomienda usar imágenes de mayor resolución espacial y temporal que las obtenidas por los sensores Landsat. Una mayor resolución espacial ayudaría a distinguir mucho mejor la zona de frontera entre bofedal y no bofedal. Una mayor resolución temporal ayudaría a mejorar el estudio del comportamiento de los bofedales en el tiempo, pudiendo analizar las variaciones de los índices en intervalos de tiempos más cortos.

Se recomienda usar imágenes radar para que se pueda analizar los bofedales en presencia de nubes y ver la respuesta de los bofedales ante este tipo de imágenes.

Se recomienda realizar trabajos de que permitan conocer valores más exactos del contenido volumétrico de agua (humedad) y de la profundidad de los bofedales, ya que con estos datos se podrá realizar un cálculo más exacto VPAA de los bofedales.

Se recomienda realizar una librería espectral de la vegetación presente en los bofedales con equipos que permita tomar datos en campo, en el mismo bofedal, equipos como los Espectroradiómetros de campo y calibrar los espectros obtenidos por los sensores de los satélites más adecuados.

Se recomienda también iniciar los estudios en lo referente a la forma de distribución de agua de los bofedales a los ríos, así calcular cuánto del agua almacenada por los bofedales llega al río y cuánto tiempo demanda este proceso.

## REFERENCIAS

1. Adams, J. B., Smith, M. O. y Johnston, P. E. (1985). *Spectral mixture modelling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site. Journal of Geophysical Research* **91**, 8,098–8, pp.112.
2. Alegría. M. (2005). Protección de humedales en el Norte de Chile. <http://www.dga.cl/otros/publicacioneslinea/archivos/humedales5.pdf>. Fecha de acceso 20/5/2015
3. Alexander Ariza. (2013): Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data ContinuityMision) version 1.0. Instituto Geografico Agustin Codazzi, Bogota, Colombia
4. Alfred Stein Freek; Van der Meer; Ben Gorte. (2002). *Spatial Statistics For Remote Sensing*. New York. Kluwer Academic Publishers, pp. 187
5. Alzérreca H. (2001) Características y distribución de los bofedales en el ámbito boliviano del sistema T.D.P.S.
6. AMIEL, R. (1964). Características hidrogeológicas de los ríos Rímac y Chillón. Clase Tesis: Bachiller en Ciencias Geológicas. Tesis de grado: Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Facultad De Geología, Minas, Metalurgia Y Ciencias Geográficas, pp. 60
7. Anderson, E.P., Marengo, J., Villalba, R., Halloy, S., Young, B., Cordero, D., Gast, F., Jaimes, E. & Ruiz, D. (2011) *Consequences of climate change for ecosystems and ecosystem services in the Tropical Andes*. In: Herzog, S.K., Martínez, R., Jørgensen, P.M. y Tiessen, H. (eds.) *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*, Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) (Brazil) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), pp. 348
8. Angulo, A., De la Riva, I., Córdova-Santa Gadea, J., Veloso, A., Núñez, H., Úbeda, C., Lavilla, E. y Blotto, B. (2010) *Rhinella spinulosa*. In: *IUCN 2013 Red List of Threatened Species*, Version 2013.2. [www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org). Fecha de acceso: 27/6/2016.

9. B. D. Cullity and S. R. Stock, 2001. *Elements of X-ray diffraction*. New York. Prentice Hall 3<sup>ed</sup>
10. Baumgardner, M. F., Stoner, E. R., Silva, L. F. y Biehl, L. L. (1985). *Reflectance properties of soils*. In Brady, N. (ed). *Advances of Agronomy*. Academic Press, New York, 1–44.
11. Birdlife International (2003) *Birdlife IBA Factsheet 051: Peruvian High Andes*. BirdLife International World Bird Database, Version 2.0, Cambridge. <http://www.birdlife.org/datazone/ebas/index.html?action=EbaHTMDetails.aspysid=52ym=0>. Fecha de acceso 27/6/2016.
12. Bolstad, P.V., Stowe, T. (1994). *An evaluation of DEM accuracy: elevation, slope, and aspect*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 60 (11), 1327 – 1332.
12. Brady, N. C., and R. R. Weil. 2002. *Nature and Properties of Soils*. 13th ed. Pearson Education, Inc. Delhi, India, pp. 191
13. Canales, C. y Tapia M. (1987) *Producción y Manejo de Forrajes en los Andes del Perú (Production and Management of Forage in the Peruvian Andes)*. Proyecto Investigación de los Sistemas Agropecuarios Andinos, PISA (INIPA, CIID, ACDI), Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga, Lima, 304
14. Canty. M.J, (2010). *Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing, With Algorithms for ENVI/IDL, Second Revised Edition*, Taylor y Francis, CRC Press
15. Cerrate de Ferreyra, E. (1979) *Vegetación del Valle de Chiquian, Provincia de Bolognesi, Departamento de Ancash (Vegetation of Chiquian Valley, Bolognesi Province, Ancash Department)*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Editorial Los Pinos, Lima, pp. 65
16. Chulluncuy, N. (2011). *Tratamiento de agua para consumo humano*, Ingeniería Industrial n° 29, 153-170
17. Cleef, A.M. (1981). *The Vegetation of the Páramos of the Colombian Cordillera Oriental*. *Dissertationes Botanicae*, 61, J. Cramer, Vaduz, Principado de Liechtenstein, pp.321

18. Condit, H. R. (1970). *The spectral reflectance of American soils. Photogrammetric Engineering y Remote Sensing* **36**, 955–966.
19. Cooper, D.J., Wolf, E.C., Colson, C., Vering, W., Granda, A. y Meyer, M. (2010) *Alpine peatlands of the Andes, Cajamarca, Peru. Artic, Antarctic, and Alpine Research*, 42(1), 19–33.
20. Cortéz, C., Reichle, S., Sinsch, U., Köhler, J., Arizabal, W., Veloso, A., Núñez, H., y Lavilla E. (2010) *Pleurodema marmoratum*. In: *IUCN 2013 Red List of Threatened Species, Version 2013.2*. Online at: [www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org), accessed 27 junio 2016.
21. Cuello, N. y Cleef, A.M. (2009) *The páramo vegetation of Ramal de Guaramacal, Trujillo state, Venezuela*. 2. Azonal vegetation. *Phytocoenologia*, 39(4), 389–409
22. Dirksen, C. (1999). *Soil Physics Measurements. GeoEcology paperback*. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, pp. 154
23. Drake, N. A., Mackin, S., y Settle, J. J. (1999). *Mapping vegetation, soils, and geology in semiarid shrublands using spectral matching and mixture modeling of SWIR AVIRIS imagery. Remote Sensing of Environment*, **68**, 12–25.
24. Elvidge, C. D. (1990). *Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant material. International Journal of Remote Sensing* **11**, 1,775–1,795.
25. Feynman, R. P., R. B. Leighton, and M. Sands. (2005). *The Feynman Lectures on Physics*. 2nd edn. 3 vols. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
26. Flores Cartagena, D., (2002). *Identificación y análisis de cambios en bofedales de la Cordillera Occidental y del Altiplano de Bolivia*. Tesis Maestría Profesional en “Levantamiento de recursos hídricos (Manejo y conservación de cuencas)” Thesis, Universidad Mayor de San Simón, Internacional Institute for Infrastructural Hydraulic and Environmental Engineering, Santa Cruz.
27. Flórez Martínez, A. (1992) *Las praderas nativas del Perú (Native grasslands of Peru)*. In: Flórez Martínez, A., Inouye, E.M. y San Martín Howard, F. (eds.) *Manual de Forrajes para Zonas Áridas y Semiaridas Andinas (Manual of Forage for Andean Arid and Semiarid Zones)*. Red de Rumiantes Menores, Lima, 55–124.

28. Flórez Martínez, A. (2005) Manual de Pastos y Forrajes Altoandinos (Manual of Andean Pastures and Forage). ITDG AL, OIKOS, Lima, 53
29. Forestier, G., J. Inglada, C. Wemmert, P. Gancarski. (2009). *Mining spectral libraries to study sensors' discrimination ability. Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology IX*. V. 7478, 1-9.
29. Fundación Futuro Latinoamericano (FFLA). *Proceso de conformación del Consejo de Recursos Hídricos de la Cuenca Interregional Chillón, Rímac y Lurín, Perú. Una experiencia de gobernanza. Quito-Ecuador. 2015, pp.21*
30. Franklin, J. (1995). *Predictive vegetation mapping: Geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. Progress in Physical Geography*, 19, 474–499.
31. Gandía, S. (1991): La teledetección en los inventarios agrarios. En: La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables. Agricultura. Curso de Postgrado. Coord.: Gandía, S. y Meliá, J. Universitat de València. Estudi General. Unidad de Teledetección. Departament de Termodinàmica, 313-324.
32. Gao, B. (1996), *IDA—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, Remote Sens. Environ.*, **58**, 257 – 266
33. Gates, D. M., Keegan, H. J., Schleter, J. C. y Weidner, V. R. (1965). *Spectral properties of plants. Applied Optics* **4**, 11–20.
34. Gil, E. (2011). *Bofedal: Humedal altoandino de importancia para el desarrollo de la región Cusco. 1-10.*
35. Gu, Y., Brown, J.F., Verdin, J.P., Wardlow, B.,( 2007). *A five-year analysis of MODIS IDV and IDA for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. Geophys. Res. Lett.* **34**, L06407, <http://dx.doi.org/10.1029/2006GL029127>. Fecha de acceso: 15/4/2016
36. Gueymard, C. (2004). *“The sun’s total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models.” Solar Energy* **76** (4): 423–453.
37. Hapke, B. (1981). *Bidirectional reflectance spectroscopy, 1, theory. Journal of Geophysical Research* **86**, 3,039–3,054.

38. Hapke, B. (2005). *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*. Cambridge: Cambridge University Press.
39. Hardisky, M., Klemas, V., and Smart, R. (1983). *The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of Spartina alterniflora canopies*, *Photogramm. Eng. Rem. S.*, 49(1), 77–83
40. Hastenrath, S. L. (2009): *Past glaciation in the tropics*. *Quaternary Science Reviews*, 28: 790-798.
41. Hedegaard, S.M., Sorensen, L.S., Forsberg, R., (2012). *ASTER GDEM validation with LiDAR data over coastal regions of Greenland*. *Remote Sensing Letters* 3, p 85-91
42. Hoffmann, D. y Requena, C. 2012. Bolivia en un mundo 4 grados más caliente. Escenarios sociopolíticos ante el cambio climático para los años 2030 y 2060 en el altiplano norte. La Paz – Bolivia
43. Irons, J. R., Weismiller, R. A. y Petersen, G. W. (1989). *Soil reflectance*. In G. Asrar (ed). *Theory y Applications of Optical Remote Sensing*. Wiley, New York, 66–106
44. Jackson, R. D. and Huete, A. R. (1991). *Interpreting vegetation indexes*, *Prev. Vet. Med.*, 11(3–4), 185–200
45. Jiménez J. (2005). Estimación de la temperatura y la emisividad de la superficie terrestre a partir de datos suministrados por sensores de alta resolución. Facultad de Física, Departamento de Termodinámica, Universidad de Valencia, 12 – 30.
46. Jomelli, V.; Favier, V.; Rabatel, A.; Brunstein, D.; Hoffmann, G.; and Francou, B. (2009): *Fluctuations of glaciers in the tropical Andes over the last millennium and palaeoclimatic implications: A review*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, doi: 10.1016/j.palaeo.2008.10.033.
47. Josse, C., Cuesta, F., Navarro, G., Barrena, V., Cabrera, E., Chacón-Moreno, E., Ferreira, W., Peralvo, M., Saito, J. y Tovar, A. (2009) *Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. (Ecosystems of Northern and Central Andes. Bolivia, Colombia, Ecuador, Peru and Venezuela)*. Documento Técnico, Programa Regional ECOBONA-Intercooperation, CONDESAN-

Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, Secretaría General de la Comunidad Andina, Lima, pp. 96

48 Kaufman, Y. J., A. E. Wald, L. A. Remer, B.-C. Gao, R.-R. Li, and L. Flynn. (1997). The MODIS 2.1- $\mu\text{m}$  Channel-Correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol . IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1286-1298.

49. Kauth, R. J., y Thomas, G. S. (1976). *The Tasseled Cap — A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, 4041–4051

50. La Fuente, A. A. Velasco y H. Alzérreca. (1988). Evaluación de la Productividad de Campos Nativos de Pastoreo en Ulla Ulla. En: Primera Reunión Nacional en Praderas Nativas de Bolivia. Programa de Autodesarrollo Campesino, Corporación Desarrollo de Oruro (PAC, CORDEOR). Oruro, Bolivia, 56-64.

51. Lagos, N.A., Paolini, P., Jaramillo, E., Lovengreen, C., Duarte, C. and Contreras, H., 2008, *Environmental processes, water quality degradation, and decline of waterbird populations in the Rio Cruces wetland, Chile. Wetlands*, **28**, 938–950.

25. Lavado, C.W.S.; Espinoza, J.C. *Impactos De El Niño Y La Niña En Las Lluvias Del Perú (1965-2007)*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **v.29, n.2**, 171 - 182, 2014

53. Lavender Samantha, Lavender Andre. 2016. *Practical Handbook of Remote Sensing*. New York. CRC Press

54. Lillesand, T.M., y Kiefer, R.W. (2000). *Remote sensing and image interpretation*, 4th edition New York: John Wiley y Sons, Inc.

55. Longair, M. S. 2003. *Theoretical Concepts in Physics*. 2nd edn. Cambridge: Cambridge University Press.

56. Lu, D., Morana, E. y Batistella, M. (2003). *Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification. Remote Sens. Environ.*, **87**, 456-469.

57. Lumbreras, L. (2006). *Un formativo sin cerámica y cerámica preformativa (A formative without pottery and preformative pottery)*. Estudios Atacameños. Arqueología



y *Antropología Surandinas* (Atacama's studies. Archeology and Anthropology of Southern Andes), 32, 1–34

58. Lunetta, R. S. (1998). Applications, project formulation, and analytical approach. In *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications* (Lunetta, R. S. y Elvidge, C. D., eds), Taylor y Francis, London, pp. 119.

59. Maldonado Fonkén, M.S., Maldonado, L. (2010) *Los Bofedales: "Un oasis en la puna"* (Bofedales: "an oasis in the puna"). *Ancash, Anuario Cultural* (Ancash Cultural Yearbook), 70–77, Asociación Ancash, Antamina, Huaraz).

60. Maldonado Fonkén, M.S. (2010) *Comportamiento De La Vegetacion De Bofedales Influenciados Por Actividades Antropicas* (Bofedales Vegetation Influenced by Anthropogenic Activities). *Magister thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú*, pp. 119

61. Maldonado Fonkén (2014). *An introduction to the bofedales of the Peruvian High Ande. Mires and Peat. v 15, 1-13.*

62 Markham, B. and Barker, J. (1986). *Landsat MSS and TM post-calibration dynamics range, exoatmospheric reflectance and at satellite temperature. EOSAT. Landsat Technical Note, 3-8.*

63. Miller, J., y Franklin, J. (2002). *Modeling the distribution of four vegetation alliances using generalized linear models and classification trees with spatial dependence. Ecological Modelling, 157, 227–247*

64. MINAG (2004) Aprueban categorización de especies amenazadas de fauna Silvestre. Decreto Supremo N° 034- 2004-AG, Ministerio de Agricultura (MINAG), El Peruano, Lima, 323527–323539

64. MINAG (2006) Aprueban categorización de especies amenazadas de flora silvestre. Decreto Supremo N° 043-2006-AG, Ministerio de Agricultura (MINAG), El Peruano, Lima

66. MINAM (2015) Memoria Descriptiva del Mapa de Cobertura Vegetal del Perú. Ministerio del Ambiente (MINAM), Lima, pp. 77

67. Moore, I. D., Grayson, R. B., y Ladson, A. R. (1991). *Digital terrain modeling — A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological Processes*, 5, 3–30.
68. Moya, E., Chambi Pacoricona, N., Quiso Choque, V. y Tito Velazco, F. (1994) *Cosmovisión y Conocimiento de los Alpaqueros Aymaras* . Instituto Nacional de Investigación Agraria y Agroindustrial (INIAA), Lima, 118
69. Mustard, J. F. y Pieters, C. M. (1987). *Quantitative abundance estimates from bidirectional reflectance measurements. Journal of Geophysical Research* **92**, 617–626.
70. Olarte N., Bertha. 2002. “Plan integral de gestión ambiental de residuos sólidos en el distrito de Carabayllo, Lima”. Tesis para optar el grado de magister en ingeniería sanitaria y ambiental. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
71. Painter, James (2007) *Deglaciation in the Andean Region, Human Development Report 2007- 2008, s.l.*
72. Palacios, F. (1977) Pastizales de regadío para alpacas. Pastores de Puna (Puna Herders), Instituto de Estudios Peruanos. Lima, 155–170
73. Pinedo, D. (2000) Manejo comunal de pastos, equidad y sostenibilidad en una comunidad de la Cordillera Huayhuash (Perú: El Problema Agrario en Debate), Seminario Permanente de Investigación Agraria (SEPIA), José Faustino Sánchez Carrión, Lima, VIII, 277– 326.
74. Prieto G. Laura J. Luna D, Laguna S. (2001). Características y distribución de los bofedales en el ámbito boliviano del sistema T.D.P.S. 1era ed. Editorial Plural. Editores. La Paz
75. Quirós R. (2009). Clasificación de Imágenes Multiespectralesaster Mediante Funciones Adaptativas (TESIS DOCTORAL) Universidad De Extremadura. Cáceres, España
76. Rabatel, A., Francou, B., Jomelli, V., Naveau, P., Grancher, D. (2008). *A chronology of the Little Ice Age inthe tropical Andes of Bolivia (16° S) and its implications for climate reconstruction. Quaternary Research*, 70: 198-212.

77. Rabatel, A., Jomelli, V., Naveau, P., Francou, B., Grancher, D. (2005). Dating of Little Ice Age glacier fluctuations in the tropical Andes: Charquini glaciers, Bolivia, 16°S. *C. R. Geoscience*, 337: 1311-1322
- 78 Rahman, H. and G. Dedieu, 1994: SMAC: A simplified method for the atmospheric of satellite measurements in the solar spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 123-143.
79. Ramírez, D. (2011) Flora Vascular Y Vegetación De Los Humedales De Conococha, Ancash, Perú. Biologist Degree Thesis. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 110
80. Ramírez, E., Francou, B., Ribstein, P., Descloitres, M., Guerin, R., Mendoza, J., Gallaire, R., Pouyaud, B., Jordan, E., 2001. Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16°S). *Journal of Glaciology* 47 (157), 187–194.
81. Ridd, M. K. (1995). Exploring a V–I–S (vegetation–impervious surface–soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2165–2185.
82. Rivas-Martinez, S. y Tovar, O. (1982) Vegetatio Andinae, I. Datos sobre las comunidades vegetales de los Andes Centrales del Perú. *Lazaroa*, 4, 167–187
83. Roberts, D. A., Batista, G. T., Pereira, J. L. G., Waller, E. K., y Nelson, B. W. (1998). Change identification using multitemporal spectral mixture analysis: Applications in eastern Amazonia. In R. S. Lunetta, y C. D. Elvidge (Eds.), *Remote sensing change detection: Environmental monitoring methods and applications* ( p. 137 – 161). Ann Arbor, MI: Ann Arbor Press
84. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., y Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In S. C. Freden, E. P. Mercanti, y M. Becker (Eds.), *Third earth resources technology satellite-1 symposium, volume 1: technical presentation*, NASA SP-351 (p. 309–317). Washington, D.C: National Aeronautics and Space Administration

85. Ruthsatz, B. (2012) *Vegetación y ecología de los bofedales altoandinos de Bolivia* (Vegetation and ecology of the high Andean peatlands of Bolivia). *Phytocoenologia*, 42(3–4), 113–179.
86. Sabol, D.E., Adams, J.B. And Smith, M.O. (1992). *Quantitative sub-pixel spectral detection of targets in multispectral images*. *Journal of Geophysical Research*, 97, 2659–2672.
87. Sagástegui, S., Dillon, M., Sánchez, I., Leiva, S. y Lezama P. (1999) *Diversidad Florística del Norte del Perú*. Editorial Graficart, Trujillo, Peru, pp. 228
88. Salvador, F. y Cano, A. (2002) *Lagunas y Oconales: los Humedales del Trópico Andino* (Lakes and Oconales: the Wetlands of the Tropical Andes). *Cuadernos de Biodiversidad 11*, Centro Iberoamericano de la Biodiversidad (CIBIO) (Books of Biodiversity 11, Latin American Centre for Biodiversity (CIBIO), University of Alicante, Spain, 4–9.
89. Salvador, F., Monerris, J. y Rochefort, L. (2014) *Peatlands of the Peruvian Puna ecoregion: types, characteristics and disturbance*. *Mires and Peat*, 15(3), 1–17.
90. Salvador, M. (2002) *Manual de Pastos Nativos del Parque Nacional Huascarán*. *Peruvian Trust Fund for National Parks and Protected Areas (PROFONANPE)*, Huaraz, Peru, 199
91. SGCAN (2008). *El cambio climático no tiene fronteras: Impacto del cambio climático en la Comunidad Andina*, 37. Disponible en:  
[http://www.comunidadandina.org/StaticFiles/201166181345libro\\_cambioclimatico.pdf](http://www.comunidadandina.org/StaticFiles/201166181345libro_cambioclimatico.pdf),
92. Singh, R. P. y Sirohim A. (1994). *Spectral reflectance properties of different types of soil surfaces*. *ISPRS Journal of Photogrammetry y Remote Sensing* **49**(4), 34–30.
93. Small, C. (2001). *Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis*. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 1305–1334.
94. Small, C., 2003, *High spatial resolution spectral mixture analysis of urban reflectance*. *Remote Sensing of Environment*, 88, 170–186.
95. Small, C. (2004). *The Landsat ETM+ spectral mixing space*. *Remote Sensing of Environment*, **93**, 1–17.

96. Smith, M.O., Johnson, P.E., Adams, J.B. And Gillespie, A.R., 1990, *Vegetation in deserts: I. A regional measure of abundance from multispectral images. Remote Sensing of Environment*, 31, 1–26.
97. Sobrino, J. A. (Ed.) (2000). *Teledetección*. España: Servicios de publicaciones, Universidad de Valencia, pp. 19
98. Soruco, A., C. Vincent, B. Francou, P. Ribstein, T. Berger, J. E. Sicart, P. Wagnon, Y. Arnaud, V. Favier, and Y. Lejeune (2009), *Mass balance of Zongo Glacier, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods*, *Ann. Glaciol.*, 50
99. Sotomayor, M., Canahua, F. y Vargas, B. (1990) Validación de Cercados y Mejoramiento de Bofedales en Puna Seca - (Ahijaderos). Avances. (Validation and Improvement of Wetlands Surrounded by Dry Puna - (Ahijaderos). Progress). Serie Pastos: Informe Técnico Proyecto Alpacas (Peru), No. 34, Puno (Peru) (Grazing Series: Technical Report - Alpacas Project (Peru), No. 34, Puno (Peru), 28
100. Souza Jr. C. M., Barreto, P. (2000). *An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon. International Journal of Remote Sensing*, 21 (1), 173-179.
101. Souza, C., Jr., Firestone, L., Silva, L. M. y Roberts, D. (2003). *Mapping forest degradation in the Eastern Amazon from SPOT 4 through spectral mixture models. Remote Sens. Environ.*, 87, 494-506
102. Steven, D. and Toner, M.M. (2004). *Vegetation of upper coastal plain depression wetlands: environmental templates and wetland dynamics within a landscape framework. Wetlands*, 24, 23–42.
103. Stoner, E. R. y Baumgardner, M. F. (1981). *Characteristic variations in reflectance of surface soils. Soil Science Society of America Journal* 45, 1,161– 1,165.
104. Suarez A. W. (2012). Evaluación del régimen hidrológico en la cuenca del río Chillón para escenarios de cambio climático. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos. AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA.

105. Tapia, M. (1997) Desarrollo rural en el Perú: Los diferentes caminos hacia la sostenibilidad. In: Gonzales de Olarte, E., Revesz, B. y Tapia Lima, M. (eds.) Perú: El Problema Agrario en Debate, Seminario Permanente de Investigación Agraria (SEPIA), José Faustino Sánchez Carrión, Lima, VI, 425– 464.
106. Takahashi, K.; Montecinos, A.; Goubanova, K.; Dewitte, B. *Enso regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño*, **Geophysical Research Letters**, v. 38, L10704, 2011
107. Tellería, J., Venero, J. y Santos, T. (2006) *Conserving birdlife of Peruvian highland bogs: effects of patch size and habitat quality on species richness and bird numbers*. *Ardeola*, 53(2), 271–283.
108. Thomas M. Lillesand , Ralph W. Kiefer, Jonathan W. Chipman. (2004). *Remote Sensing And Image Interpretation*. Quinta Edicion Las Vegas USA John Wiley y Sons
109. Tipler, A. P. and Llewellyn, A. R. (2000). *Modern Physics*. USA: Freeman.
110. Tompkins, S., Mustard, J. F., Pieters, C. M. y Forsyth, D. W. (1997). *Optimization of “endmember”s for spectral mixture analysis*. *Remote Sens. Environ.*, **59**, 472-489.
111. Topographic Science Working Group. (1988). *Topographic Science Working Group report to the Land Processes Branch. Earth Science and Applications Division, NASA Headquarters: Lunar and Planetary Institute, Houston, TX*, 64
112. Topp G. C. (1993). *Soil water content*. In: *soil sampling and methods of analysis*. Martin R. Carter Editor. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, 541-557.

113. Tovar, O. (1973) Comunidades Vegetales de la Reserva Nacional de Vicuñas de Pampa Galeras, Ayacucho, Perú. Publicaciones del Museo de Historia Natural “Javier Prado”, Botánica Serie B N° 27, Lima, 32
114. Tso, B. y P. M. Mather (2001). *Classification method for remotely sensed data*. London
115. Unesco (2003). *Sitio Oficial del Año Internacional del Agua Dulce*,. <http://www.wateryear2003.org>. Fecha de acceso: 17/8/2014
116. Urrutia, Rocío y Mathias Vuille. (2009) “Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century”, en *Journal of Geophysical Research*, vol.
117. Utke, A., Said, A., Koch, W., 1993. *Geomathematical optimization of Landsat-TM satellite data for geological mapping in an island arc/ ophiolite environment of the Red Sea Hills, Sudan. Geoscientific research in northeast Africa; In: Thrweihe, Schandelmeier (Eds.), Proceedings of the International Conference, 117–120*
118. Vázquez A. A. y Bautista N. 1993. Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- 119 Vermote E., D. Tanré, J. L. Deuzé, M. Herman, J. J. Morcrette, and S. Y. Kotchenova (2006), *Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum - Vector (6SV), 6S User Guide Version 3, part 1, 1-55*.

120. Vuille, M.; Francou, B.; Wagnon, P.; Juen, I. ; Kaser, G. ; Mark, B. ; y Bradley, R. (2008) : *Climate change and tropical Andean glaciers : Past, present and future*. *Earth-Science Reviews*, 89: 79-96.

121. W. G. Rees. (2012). *Physical Principles of Remote Sensing*. New York. USA. Cambridge University

122. Weberbauer, A. (1945) *El Mundo Vegetal de los Andes Peruanos (The Plant World of the Peruvian Andes)*. Ministerio de Agricultura (Ministry of Agriculture), Lima, Peru, 776

123. Wessman, C. A., Aber, J. D., Peterson, D. L. y Melillo, J. M. (1988). *Foliar analysis using near infrared reflectance spectroscopy*. *Canadian Journal of Forest Research* **18**, 6–11.

124. Willard H. H., Merrit L. L., Dean J. A. 1974. *Instrumental methods of analysis*. 5th edition Van Nostrand.

125. Williams, D. (2004). *Landsat-7 Science Data User's Handbook*, Acquired [http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_toc.html](http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html) (fecha de acceso 2009), National Aeronautics and Space Administration.

126. Weng, Q., Lu, D. & Schubring, J. 2004. *Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies*. *Remote Sens. Environ.*, **89**, 467-483.



127. Wim H. Bakker. (2009). *Principles of Remote Sensing*. Enschede, The Netherlands. ITC, 70

128. Wu, C., y Murray, A. T. (2003, 2005). *Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis*. *Remote Sensing of Environment*, **84**, 493–505.

129. Xu, Z.X.; Takeuchi, K.; Ishidaira, H. *Correlation between*. (2004). *El Nino-Southern Oscillation (ENSO) and precipitation in South-east Asia and the Pacific region*. *Hydrological Processes*, v. 18, n. 1, 107-123

.

### Anexo A

#### LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN

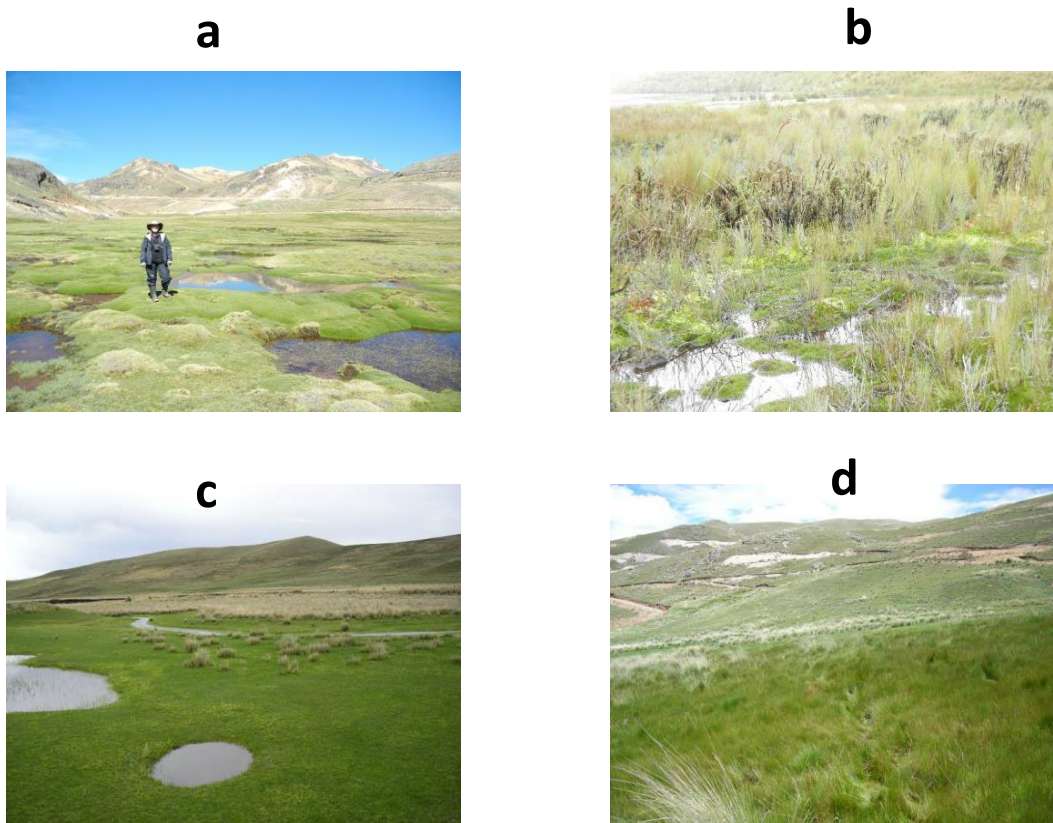
Un estudio completo sobre el sistema Físico Natural de la cuenca del río Chillón se puede encontrar el trabajo realizado por el Centro de investigación social y educación popular: Alternativa (<http://www.alter.pe>, Fecha de acceso: 1 /02/2016), Alternativa realizó un estudio titulado: Plan de Ordenamiento Ambiental y Territorial de la cuenca del río Chillón, en este trabajo se encuentran los estudios sobre: La geología de la cuenca del río Chillón, la estructura macrogeomorfológica de la cuenca del río Chillón, el sistema fluvial de la cuenca del río Chillón, el sistemas montañosos de la cuenca del río Chillón, el sistema glacial de la cuenca del río Chillón, el clima y ecología de la cuenca del río Chillón, la Hidrología de la cuenca del río Chillón. El documento completo puede ser descargado en formato PDF en: [http://www.alter.org.pe/cuenca/documentos/sis\\_natural\\_fisico.PDF](http://www.alter.org.pe/cuenca/documentos/sis_natural_fisico.PDF) (fecha de acceso 1 /02/2016)

## Anexo B.1

### CARACTERISTICA DE LOS BOFEDALES ALTO

#### B1.1 FLORA Y VEGETACIÓN DE LOS BOFEDALES

La mayoría de los bofedales alto andinos están compuestos de diferentes comunidades de vegetación (Ruthsatz 2012). Weberbauer (1945) menciona las plantas hidrofíticas que pueden estar asociados con los sistemas de bofedales: *Distichia* turberas, turberas con musgos y arbustos, prado turba, pastizales corriente (Figura B.1).



**Figura B.1** (a) *Distichia* Turberas en Huancavelica (4756 msnm), abril de 2012; (b) los musgos de turberas, arbustos en Cajamarca; (c) prado turba en el Cusco (4000 msnm), enero de 2010; d) los prados corriente en el Cusco, (4200 msnm), enero de 2010

La Figura B.1 muestra cuatro tipos de vegetación asociada a los bofedales: *Distichia* Turberas en Huancavelica en (a), musgos de turberas en (b), prado turba en (c) y prados corriente en (c)

### ***Distichia* turberas (turberas de *distichia*)**

Se produce principalmente en el centro y sur del Perú (Weberbauer 1945). Los autores (Tovar, 1973; Canales y Tapia, 1987; Flórez Martínez, 1992; Salvador, 2002, Salvador y Cano, 2002; Flórez Martínez 2005) reportan que los bofedales encuentran entre 4000-4200 ms.n.m La Figura B.2 muestra otros tipos de *Distichia* (Maldonado F, et al., 2010; Maldonado F. M.S., 2010).



**Figura B.2.** (a) *Distichia muscoides* y (b) *Plantago tubulosa* Decne

La figura B.2 muestra los tipos de *Distichia*: *Muscioide* y *Plantago tubulosa*, especies presentes en muchos bofedales del Perú

Un alimento deseable para alpacas, ovejas, llamas y caballos es la *Distichia muscoides* (Maldonado F. M.S., 2010). En Perú es poco común las Turberas con musgos y arbustos estas se encuentran al norte del Perú (Weberbauer 1945), es similar turberas de *Sphagnum* páramo (Cleef, 1981), Cuello y Cleef (2009) y Cooper et al., (2010))

La soportabilidad de los pastos de los bofedales 1.5 es de alpacas/ha./año, el cálculo aproximado de carga animal que soporta un bofedal es de 5 a 8 unidad ovino hectárea año (UO/ha /año), generando sobre pastoreo en algunos casos (Sotomayor et al., 1990).

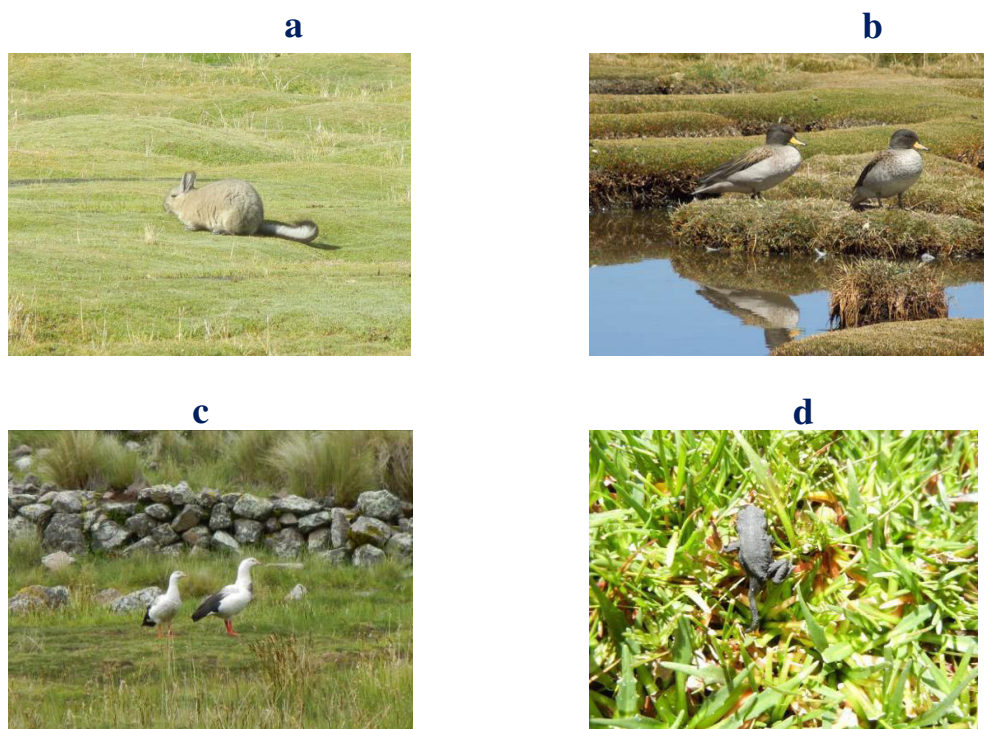
### **B.1.2 FAUNA DE LOS BOFEALES**

Los bofedales albergan a animales, como la "vicuña" *Vicugna vicugna* y "guanaco" "*Lama guanicoe*" venado cola blanca *Odocoileus virginianus* y taruca *Hip.ocamelus antisensis*. Los roedores como "vizcacha" *Lagidium peruanum* (Figura B.3 a), ratones; el puma, *Puma concolor*; zorro andino *Lycalopex culpaeus* y pampas gato *colocolo Leopardus*.

(Maldonado F. M.S. y Maldonado L. 2010). Según Tellería et al., (2006), bofedales operan "puntos calientes" locales para las aves por ejemplo, patos incluyendo *Anas flavirostris* y *Anas specularoides*; Figura B.3 b), *avefría andina resplendens Vanellus*, *Andino Chloephaga melanoptera* (Figura B.3 c). Maldonado F. M.S y Maldonado L. (2010) enumera varias otras aves registradas en bofedales en la región de Ancash. Un pájaro característico de los Andes del sur del Perú es el *Pennata de Rhea "suri"*. También se encuentran anfibios como el sapo *Rhinella Spinulosa* (Figura B.3 d), la ranas *gastrotheca marsupiata*, y *Pleurodema marmorata* y *Telmatobius jelskii*. (Angulo et al., 2010;. Cortéz et al., 2010).

### B.1.3, ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LOS BOFEDALES

Los bofedales pueden almacenar cantidades considerables de agua, lo cual es importante en el contexto del cambio climático (Maldonado F. M.S, 2010). Sin embargo, hay pocos estudios sobre la profundidad o características de turba en los bofedales peruanos (Cooper et al., 2010)



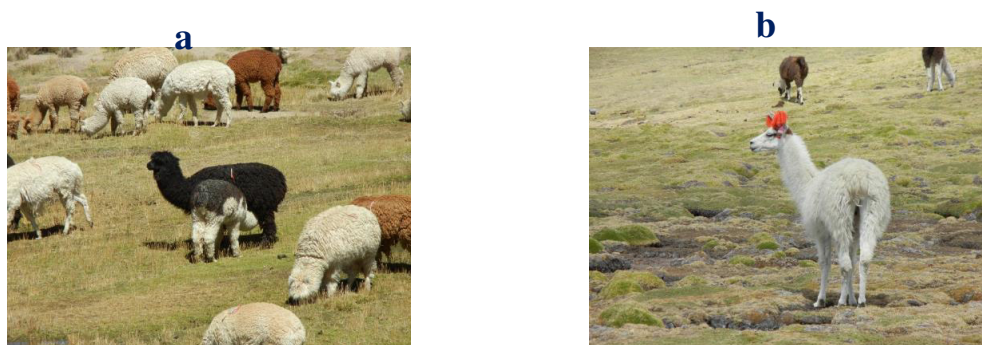
**Figura B.3.** Fauna de los bofedales.



La Figura. B.3 muestra algunos animales presentes en los bofedales: Vizcacha en (a), patos en (b), Huallatas en (c), Sapo en (d), esto demuestra que los bofedales son lugares de refugio y alimentación para muchas especies de animales.

#### **B.1.4 GESTIÓN TRADICIONAL DE PASTOREO DE LOS BOFEDALES**

Los bofedales son fuentes de alimento y agua para el ganado (Figura B.4), el agua de la cual se alimenta la vegetación de un bofedal puede ser lluvia, ríos, manantiales, etc, o haciendo canales y pozos (Palacios 1977, Canales y Tapia 1987, Moya et al., 1994, Tapia 1997, Maldonado Fonken 2010). La humedad de los suelos es una condición muy importante que permite mejorar los pastos, obtener animales más sanos, mayor producción de carne y fibra por alpacas y ovejas (Flórez Martínez 1992, 2005; Maldonado Fonken 2010). El manejo de bofedales de se puede realizar haciendo cercas para proteger los bofedales practicando el pastoreo rotativo para conservarlos (Moya et al., 1994, Pinedo 2000, Maldonado Fonken 2010).



**Figura B.4.**Animales que pastorean en los bofedales en Perú: (a) las alpacas y (b) las llamas (M.S. Maldonado Fonkén, 2014, pp. 8).

La Figura B.4 muestra algunos animales principales que son pasteados en los bofedales del Perú estos animales son: las alpacas en (a), y las llamas en (b).

#### **B.1.5 PROTECCIÓN LEGISLATIVA DE LOS BOFEDALES**

Los bofedales son "ecosistemas frágiles" según la Ley General del Ambiente del Perú, Ley N° 28611, artículo 99 (Maldonado F. M.S, 2010), porque en general existen en ella flora y fauna en peligro de extinción (*Birdlife International* 2003, MINAG 2004, 2006). Según el

DS 20-2008-EM, artículo 11: " Ninguna actividad de exploración podrá atravesar bofedales o humedales, con caminos de acceso, u originar la colocación de materiales, residuos o cualquier otra materia o sustancia sobre ellos".

#### **B.1.6 PELIGROS QUE SOPORTAN LOS BOFEDALES**

Algunos peligros que soportan los bofedales son: El sobre pastoreo de los bofedales (Flórez Martínez 2005, Maldonado F. M.S., 2010; Ramírez, 2011; Salvador et al., 2014). El corte de la turba (champa) (Salvador et al., 2014) o en la fabricación de medios de cultivo para la horticultura (Flórez Martínez, A. 2005).

Se puede encontrar más detalles de los bofedales en el artículo publicado en por Maldonado Fonkén en: [http://mires-and-peat.net/media/map15/map\\_15\\_05.pdf](http://mires-and-peat.net/media/map15/map_15_05.pdf). Fecha de acceso 15/7/2016

## ANEXO B.2

### FUNDAMENTOS FISICOS DE TELEDETECCION

#### B.2.1 ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

James Clerk Maxwell unificó las leyes de la electricidad y el magnetismo en la década de 1860, enunció que la luz era una forma de radiación electromagnética. Una de las formas de Las ecuaciones de Maxwell (Feynman, Leighton y Sands 2005), en el espacio libre se puede escribir:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{A.1}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \text{div} \vec{B} = 0 \quad \text{A.2}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{A.3}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \text{rot} \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \sigma \vec{E} \quad \text{A.4}$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$ , es la permeabilidad magnética del espacio libre.

$\vec{E}$  = intensidad de campo eléctrico ( $\text{N C}^{-1}$ ).

$\vec{B}$  = inducción magnética (T).

$\rho$  = densidad de carga eléctrica volumétrica ( $\text{C m}^{-3}$ )

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , es la permisividad eléctrica del espacio libre.

$\sigma$  = conductividad eléctrica ( $\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ ).

$t$  = tiempo (s).

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{A.5})$$

Donde E y B son los vectores de campo eléctrico y magnético respectivamente Figura B.5, y  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$  son la permisividad eléctrica y la magnética permeabilidad del espacio libre.

Para una onda plana sinusoidal tenemos:

$$E_x = E_0 \cos(\omega t - kz), \quad E_x = 0; \quad E_z = 0, \quad B_x = 0$$

$$B_y = \frac{E_0}{c} \cos(\omega t - kz), \quad B_z = 0$$



Las ecuaciones (A.3) y (A.5) se pueden expresar (Tipler, 2000):

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{A.7})$$

Derivando nuevamente en la dirección del eje Y, las ecuaciones (A.6) y (A.7) y combinándolas entre sí, se obtiene la forma general de la ecuación de onda.

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (\text{A.8})$$

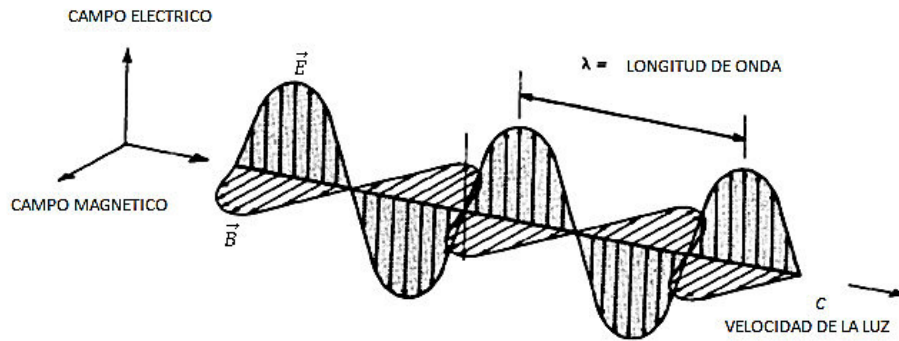
$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial y^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (\text{A.9})$$

De donde se deduce que la rapidez de las ondas electromagnéticas está dada por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (\text{A.10})$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}, \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

$c$  es la velocidad de la luz, de todas las ondas electromagnéticas, en el espacio libre. Tiene un valor de  $299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$

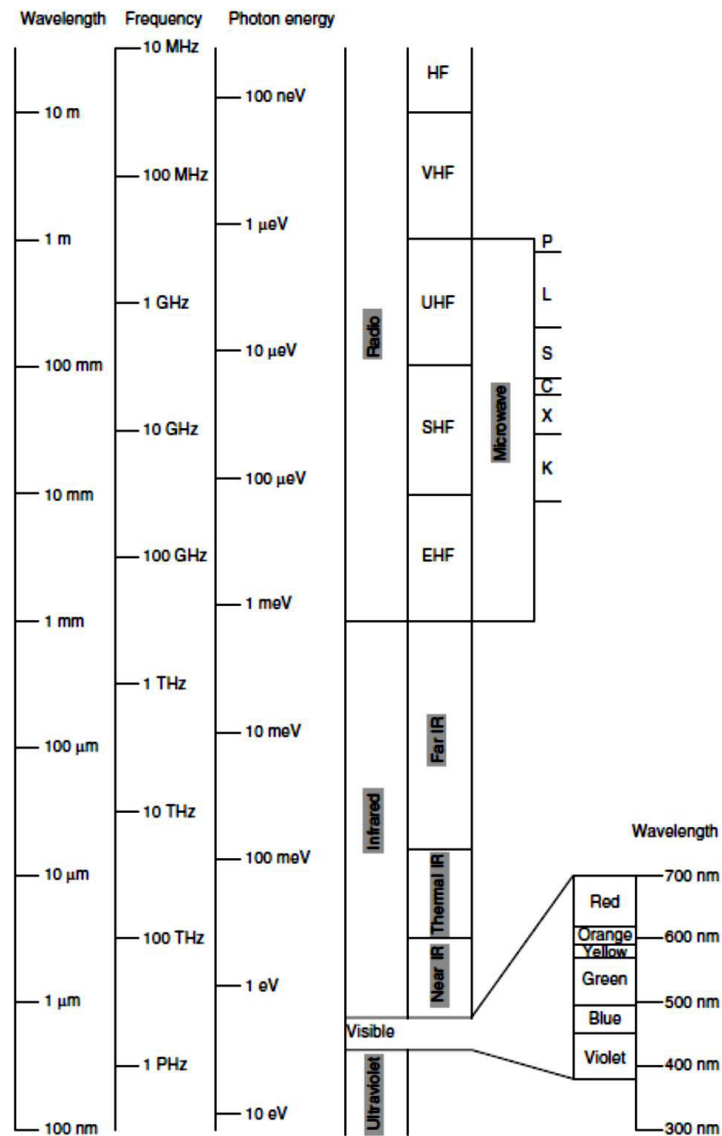


**Figura B.5.** Componentes de la onda electromagnética incluyen una onda sinusoidal eléctrica ( $\vec{E}$ ) y una onda magnética similar ( $\vec{B}$ ) en ángulo recto, siendo ambos perpendicular a la dirección de propagación. Modificado de Thomas M. Lillesand et al., 2004, pp.16

La Figura B.5 muestra las componentes de la onda electromagnética, componente onda eléctrica ( $\vec{E}$ ), y componente onda magnética ( $\vec{B}$ ). Que son mutuamente perpendiculares que se propagan a la velocidad de la luz en una dirección.

### B.2.3 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

La radiación electromagnética (EM) es la energía que se desplaza mediante el espacio y la materia con formas de ondas y una corriente de partículas llamadas fotones, la Figura B.6 ilustra el espectro electromagnético Figura B.6 (W. G. REES, 2012) p.14

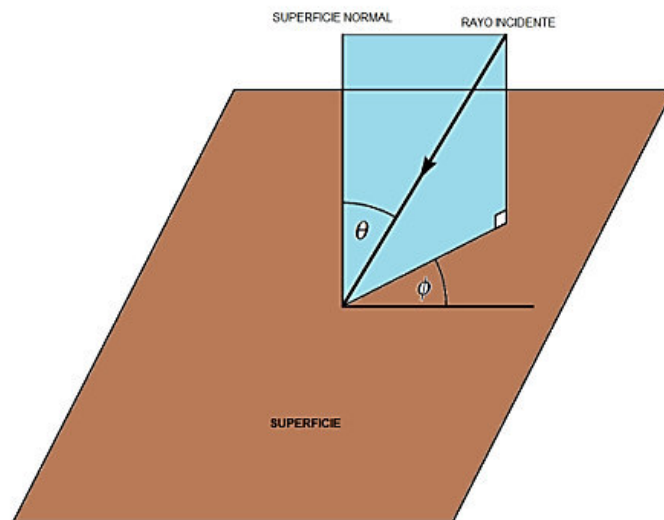


**Figura B.6.** Las ondas electromagnéticas en el espacio libre. Modificado de W. G. REES, 2012,

La Figura B.6 muestra a la onda electromagnética en sus escalas de longitud de onda, frecuencia y la energía del fotón. También se observa que el rango de la longitud de onda de la radiación visible esta entre 300 nm y 700 nm

#### B.2.4 DISTRIBUCIONES ANGULARES DE LA RADIACIÓN

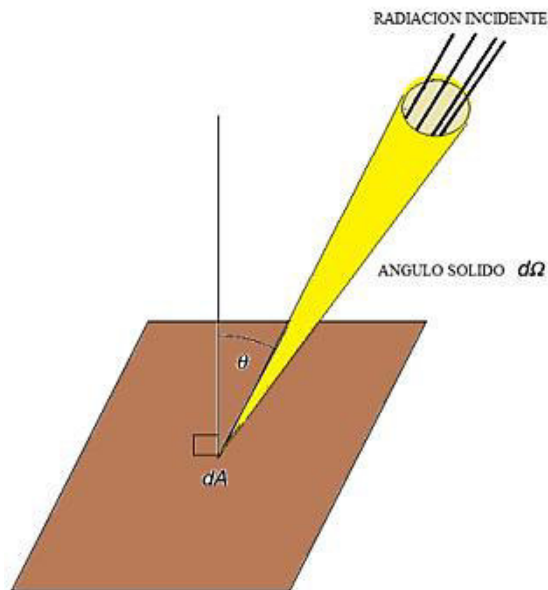
Consideramos una superficie plana que está iluminada por la radiación con una variedad de direcciones, para especificar una dirección de la radiación incidente necesitamos dos ángulos: el ángulo  $\theta$  medida entre la dirección de propagación y la normal a la superficie elemento; y el ángulo azimutal  $\phi$ , medida alrededor de la proyección normal en el plano de la superficie (W. G. REES, 2012. p.25; Hapke, 1981, 2005) (Figura B.7)



**Figura B.7.** Definición de los ángulos  $\theta$  y  $\phi$  para describir la distribución angular de la radiación. Modificado de W. G. REES, 2012, pp. 25

La Figura B.8 muestra los ángulos que describen la distribución angular de la radiación, ángulos  $\theta$  y  $\phi$  cuando estas incide sobre un superficie.

Consideramos un elemento  $dA$  de esta superficie, y la radiación incidente de la gama de direcciones entre  $\theta$  y  $\theta + d\theta$  y entre  $\phi$  y  $\phi + d\phi$ , Figura B.8



**Figura B.8.** Construcción geométrica para explicar el concepto de Radiancia. Modificado de W. G. REES, 2012, pp. 26

La Figura. B.8 muestra un esquema utilizado para explicar el concepto de Radiancia que llega a una superficie en un determinado diferencial de área.

El ángulo sólido definido por este rango de direcciones es  $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$

La potencia incidente sobre el elemento  $dA$  de esta gama de direcciones debe ser proporcional a  $dA$ . Esta relación se puede expresar como:

$$dP = L \cos\theta dA d\Omega \quad A.11$$

$dP$  es la contribución a la potencia incidente en el área  $dA$  de un ángulo sólido se puede generar en la dirección  $(\theta, \phi)$ , y  $L$  es el radiancia de la radiación incidente en esa dirección. A partir de esta definición, se deduce que la unidad en el Sistema Internacional (SI) de la radiancia es  $W \cdot m^{-2}, sr^{-1}$  (W. G. REES, 2012. P. 26)

### B.2.5 DESCRIBIENDO LAS DISTRIBUCIONES ANGULARES DE LA RADIACIÓN

La irradiancia  $E$  en la superficie se define como la potencia total incidente por unidad de superficie, y su unidad en el  $W.m^{-2}$ . Se encuentra mediante la integración de la ecuación A.12, (W. G. REES, 2012 p.27) a través de todas las direcciones para  $\theta$  y  $\pi / 2$ :

$$E = \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi=0}^{2\pi} L(entrante) \cos\theta d\Omega \quad A.12$$

La salida de la radiación se denomina exitancia radiante, y dado el símbolo  $M$ :

$$M = \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi=0}^{2\pi} L(saliente) \cos\theta d\Omega \quad A.13$$

Para la radiación isotrópica, la radiación es independiente de la dirección. En este caso, la relación entre radiancia y la exitancia (W. G. REES, 2012. p.27) está dada por

$$M = L \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} 1 \int_{\phi=0}^{2\pi} \cos\theta d\Omega = \pi L \quad A.14$$

### B.2.6 RADIACIÓN TÉRMICA

En general un objeto caliente, que no está en el cero absoluto, distribuirá su emisión en un intervalo de longitudes de onda en un espectro continuo. Para describir esta radiación debemos de incluir la variación con la longitud de onda o frecuencia. Esto se hace mediante la definición de la radiancia espectral  $L_\lambda$  tal que la radiancia  $\Delta L$  contenida en un pequeño rango de longitudes de onda  $\Delta\lambda$  (W. G. REES, 2012. p.28) está dada por

$$\Delta L = L_\lambda \Delta\lambda \quad A.15$$

En otras palabras,  $L_\lambda$  es sólo el diferencial de  $L$  con respecto a  $\lambda$ , o más estrictamente el valor absoluto (módulo) de este diferencial:

$$L_\lambda = \left| \frac{\partial L}{\partial \lambda} \right| \quad A.16$$

de unidades  $W.m^{-2}sr^{-1}$

en términos de la frecuencia  $f$ :

$$L_f = \left| \frac{\partial L}{\partial f} \right| \quad A.17$$

de unidades  $W \cdot m^{-2} sr^{-1} Hz^{-1}$ , y la relación entre las definiciones (A.16) y (A.17) expresa

$$\frac{L_\lambda}{L_f} = \left| \frac{\partial f}{\partial \lambda} \right| = \frac{c}{\lambda^2} = \frac{f^2}{c} \quad A.18$$

Si hacemos una cavidad cerrada con paredes opacas, y llevamos a cabo la cavidad a una temperatura absoluta  $T$ , la radiación electromagnética dentro de él se conoce como la radiación del cuerpo negro (W. G. REES, 2012. p.28).

La radiancia espectral de esta radiación la calculó Max Planck (Figura B.9) durante los primeros años del siglo XX, con el uso de la mecánica cuántica (Longair, 2003).

$$L_f = \frac{2hf^3}{c^2(e^{hf/kT}-1)} \quad A.19$$

También se expresa, en formato espectral, mediante la introducción de un intervalo de longitud de onda y la integración de más radiancia espectral de acuerdo con la relación Planck está dada por

$$L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT}-1)} \quad A.20$$

donde  $k$  es constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} JK^{-1}$ ),  $c$  es la velocidad de la luz (en una de vacío) y  $T$  es la temperatura

En este caso, la ecuación (A.19) o (A.20) describe la radiación que emerge desde el agujero, y de cualquier cuerpo negro (emisor perfecto de la radiación térmica) a la temperatura  $T$ . En longitudes de onda suficientemente largos, la ecuación (1.19) se puede aproximar como

$$L_f \approx \frac{2kTf^2}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad A.21$$

o como

$$L_{\lambda} \approx \frac{2kTc}{\lambda^4} \quad A.22$$

Esto se conoce como la aproximación de Rayleigh-Jeans,

Podemos integrar la fórmula de Planck (ya sea (A.19) o (A.20)) para calcular la radiancia total de la radiación del cuerpo negro sobre todas las longitudes de onda:

$$L = \int_0^{\infty} L_{\lambda} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 \quad A.23$$

Dado que la radiación es isótropa, se encuentra la exitancia  $M$  total radiante, utilizando la ecuación (A.14), para ser

$$M = \pi L = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 \quad A.24$$

Esto se escribe normalmente de forma más compacta como (W. G. REES, 2012. p.31)

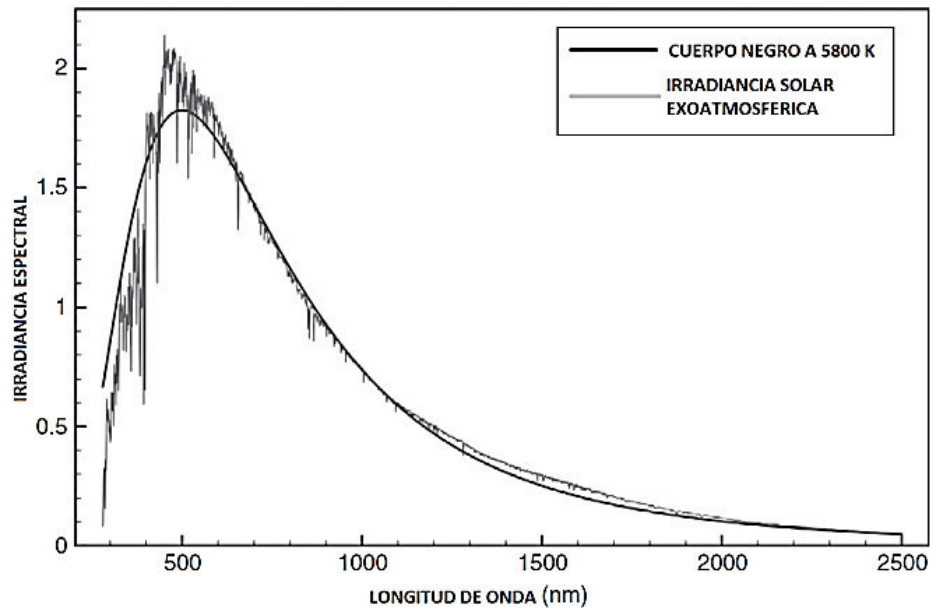
$$M = \sigma T^4 \quad A.25$$

donde  $\sigma = 2\pi^5 k^4 / 15c^2 h^3 \approx 5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$  es la constante de Stefan-Boltzmann, y la ecuación (A.23) se llama la ley de Stefan. Muestra la cantidad de energía emitida por un cuerpo negro a la temperatura  $T$ , integrada sobre todas las longitudes de onda. Si queremos saber cómo se distribuye el energía en esta longitud de onda, podemos, por supuesto, usar la ecuación (A.19) directamente, pero puede ser suficiente simplemente para conocer la longitud de onda  $\lambda_{max}$  a la que  $L_{max}$  alcanza un máximo. Esto se encuentra diferenciando la ecuación (A.19), obteniendo

$$\lambda_{max} = \frac{A}{T} \quad A.26$$

donde  $A$  es una constante cuyo valor es de aproximadamente  $2,898 \times 10^{-3} K m$ . La ecuación (A.26) se llama la Ley de Wien, o la Ley del desplazamiento de Wien. Por ejemplo, el Sol es una aproximación bastante buena para un cuerpo negro a una temperatura de alrededor de  $5800 K$  (Figura B.9), por lo que la radiancia espectral pico se produce a  $\lambda_{max} \approx 0.5 \mu m$ , en el centro del espectro visible en la que esperamos que sea. Si, por otra parte, consideramos un cuerpo negro a una temperatura de  $280 K$ , que es bastante

típico de temperaturas en la superficie de la Tierra, encontramos  $\lambda_{max} \approx 10.3 \mu m$  en la región térmica de infrarrojo del espectro electromagnético (W. G. REES, 2012. p.33).



**Figura B.9** Irradiancia espectral del Sol (curva gris) y la irradiancia espectral de un cuerpo negro a 5800 K que subtende el mismo ángulo sólido como el Sol (curva negra), modificado de Gueymard (2004). (W. G. REES, 2012. pp.34)

La Figura B.9 muestra una gráfica en la que están representadas la Irradiancia espectral del sol y la de un cuerpo negro. Se observa que la irradiancia del cuerpo negro presenta curvas suaves, comparada que no es el caso de la irradiancia solar extratmosférica.

También es posible que a veces se necesite calcular la luminosidad o exitancia radiante de un cuerpo negro en un intervalo finito de longitudes de onda. Esto puede simplificarse un poco mediante la integración con respecto a una variable adimensional. En concreto, podemos poner

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 (f(x_1) - f(x_2)) \quad A.27$$

donde las variables adimensionales  $x_1$  y  $x_2$  se definen por  $x_i = \frac{hc}{\lambda_i kT}$  y la función  $f(x)$  (W. G. REES, 2012. p.32) se define por

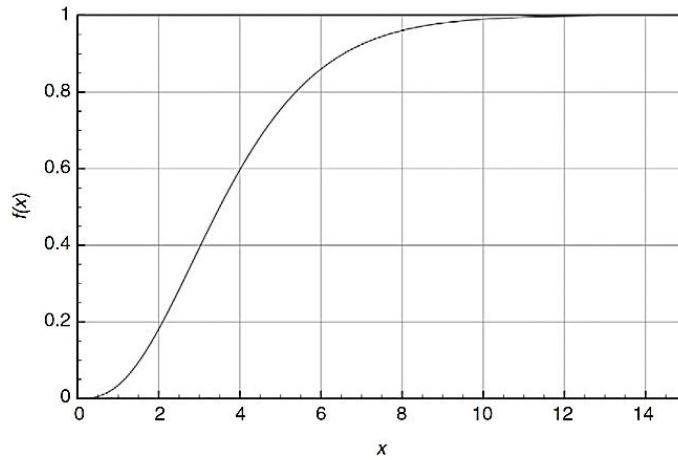
$$f(x) = \frac{15}{\pi^4} \int_0^x \frac{z^3 dz}{e^z - 1} \quad A.28$$



La función  $f(x)$  se representa en la figura B.10. Este no es un modelo particularmente exacto para materiales reales, por lo que es necesario introducir la idea de la emisividad  $\varepsilon$  para relacionar la radiancia real de un cuerpo a temperatura  $T$  para el valor del cuerpo negro. La emisividad a menudo depende de la longitud de onda, por lo que, en general, debemos escribirla como  $\varepsilon(\lambda)$  (W. G. REES, 2012. p. 32) y podemos definirla a través

$$L_\lambda = \varepsilon(\lambda)L_{\lambda,P}, \quad A.29$$

donde ahora hemos escrito  $L_{\lambda,P}$ , para la radiación del cuerpo negro se define por la ecuación (1.20) (la "P" significa 'Planck').



**Figura B.10** La función  $f(x)$  se define en la ecuación (1.28). Se muestra la fracción del total de la radiación del cuerpo negro emite hasta  $x = \frac{hc}{\lambda kT}$  (W. G. REES, 2012)

La figura B.10 muestra la función  $f(x)$  que define el comportamiento de la fracción total de la radiación del cuerpo negro emite hasta un valor  $x = \frac{hc}{\lambda kT}$ , observamos que la función  $f(x)$  esta comprendida en el rango de 0 a 1.

La temperatura de brillo ( $T_b$ ) es la temperatura del cuerpo negro equivalente que daría a la misma radiación en la longitud de onda  $\lambda$  en estudio. Al combinar las ecuaciones (A.20) y (1.29), se muestra que en la longitud de onda  $\lambda$ , un cuerpo con la temperatura  $T$  y emisividad  $\varepsilon$ , tiene una temperatura de brillo  $T_b$ , (W. G. REES, 2012. p. 33) que se da por:

$$\varepsilon = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT} - 1)} = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT_b} - 1)} \quad A.30$$

$T$  es

$$T = \frac{hc}{\frac{hc/\lambda k T_b - 1}{k \lambda \ln(1 + \frac{e}{\varepsilon})}} \quad A.31$$

pero para longitudes de onda suficientemente larga (de bajas frecuencias), es posible aproximar de manera muy sencilla, usando la aproximación de Rayleigh-Jeans, como

$$T_b = \varepsilon T \quad A.32$$

Si la emisividad  $\varepsilon$  está cerca de 1, (1.31) (W. G. REES, 2012. p.23) se puede aproximar como

$$T \approx \frac{T_b}{1 + \frac{\lambda k T_b \ln \varepsilon}{hc}} \quad A.33$$

## B.2.7 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR

El Sol puede considerarse como un cuerpo negro con temperatura  $T$  aproximada de 5800 K (Figura B.9). Se puede suponer como si fuera una esfera de radio  $r = 6,96 \times 10^8 \text{ m}$ , situada a una distancia  $D = 1,50 \times 10^{11} \text{ m}$  de la Tierra (unidad astronómica). (W. G. REES, 2012, 34)

De (1.25) y (1.29), podemos escribir la exitancia radiante del Sol, integrada sobre todas las longitudes de onda, como  $M = \sigma T^4 = 6.5 \times 10^7 \text{ W m}^{-2}$ . La potencia total radiada por el Sol (esto generalmente se llama su luminosidad) se obtiene multiplicando este por la zona de la superficie del Sol:  $P = 4\pi r^2 \sigma T^4 = 3.87 \times 10^{26} \text{ W}$ . Al considerar una esfera de radio  $D$  centrado en el Sol, podemos ver que la irradiancia en la Tierra (pero por encima de la atmósfera de la Tierra, así que no es necesario tener en cuenta la absorción atmosférica) (W. G. REES, 2012. p.34) viene dada por

$$E = \frac{P}{4\pi D^2} = 1.37 \times 10^3 \text{ W m}^{-2} \quad A.34$$

Este valor es la irradiancia exoatmosférica media. Podemos calcular la correspondiente radiancia exoatmosférica,  $L$ , teniendo en cuenta la gama de direcciones sobre el que se distribuye esta radiación. Visto desde una distancia  $D$ , el Sol subtiende un ángulo

sólido  $\Delta\Omega = \frac{\pi r^2}{D^2}$  que es mucho menor que 1 sr, por lo que una estimación suficientemente precisa está dada por

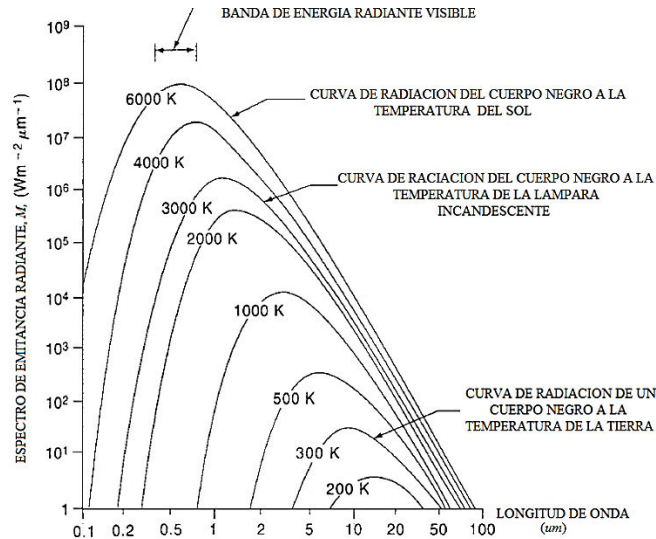
$$L = \frac{E}{\Delta\Omega} = \frac{\sigma T^4}{\pi} = 2.20 \times 10^7 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \quad \text{A.35}$$

Esta radiación se limita a la gama de ángulo sólido  $\Delta\Omega$ . Fuera de este rango, L es, por supuesto, cero.

También se calcula espectralmente la radiancia exoatmosférica, teniendo la Ecuación (A.20) como punto de partida y siguiendo el mismo procedimiento (W. G. REES, 2012. p.35)

$$L_\lambda = \frac{2\epsilon h c^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad \text{A.36}$$

que por supuesto es sólo la fórmula de Planck para la radiación, modificada por la ecuación (A.29) para tener en cuenta la emisividad,  $\epsilon$ , Figura B.11



**Figura B.11** Distribución espectral de la energía radiada desde los cuerpos negros de diferentes temperaturas.

Modificado de Thomas M. Lillesand et., al, 2004, pp. 20

La Figura B.11 muestra el comportamiento espectral de la energía que irradian los cuerpos negros cuando son sometidos a diferentes temperaturas. Desde temperatura de 200 k hasta los 600 k

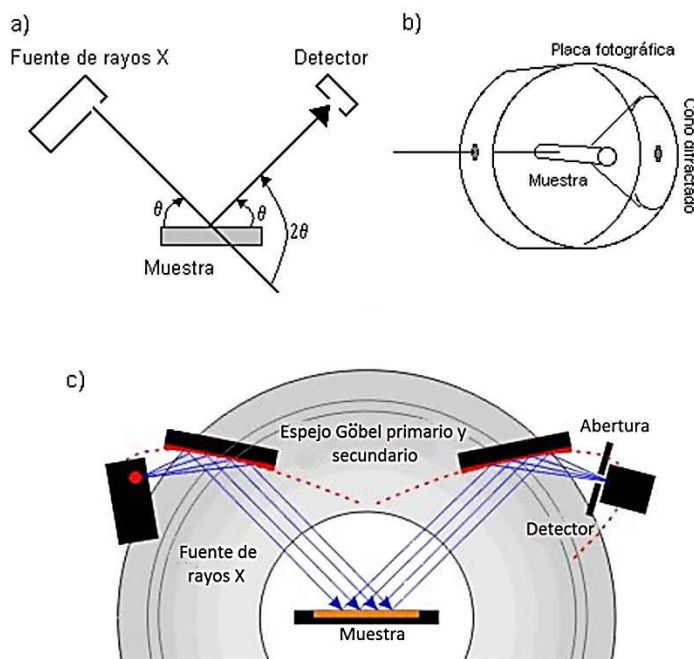
### B.2.9 TÉCNICA DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Al incidir radiación sobre los átomos, estos se convierten en emisores puntuales, expandiéndose la radiación emitida por cada átomo en forma de onda esférica. Estas ondas esféricas interfieren con las emitidas por los demás átomos y finalmente la radiación difracta en determinadas direcciones. Estas direcciones coinciden con la dirección de las reflexiones en los planos atómicos de la red y se pueden calcular utilizando la ley de Bragg (B. D. Cullity and S. R. Stock, 2001) ecuación A.48.

$$d_{hkl} = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta)} \quad (\text{A.48})$$

Donde  $d_{hkl}$  es la distancia interplanar de una familia de planos,  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación incidente y  $2\theta$  es el ángulo difractado por la radiación.

Existen distintas geometrías para poder realizar las medidas de difracción de rayos X, tal y como se muestra en la Figura B.12 (B. D. Cullity and S. R. Stock, 2001)

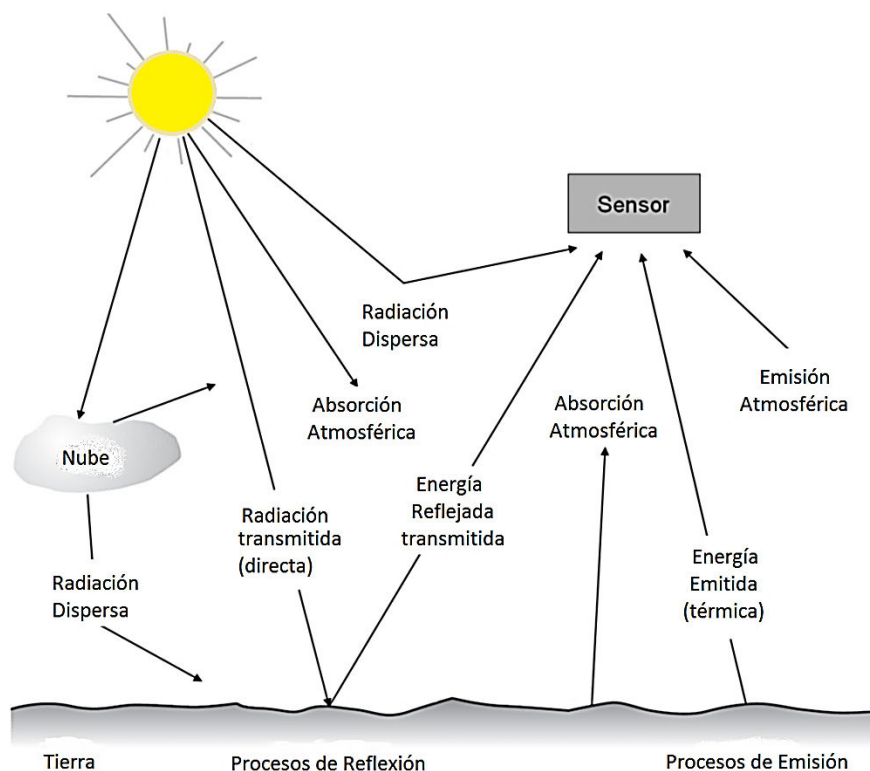


**Figura B.12:** Distintas geometrías utilizadas en los experimentos de difracción de rayos X. B. D (Cullity and S. R. Stock, 2001)

La figura B.12 expone los diferentes tipos de geometrías que se utilizan en un análisis de difracción de rayos X : a) Geometría de Bragg-Brentano, b) Geometría de Debye-Scherrer, c) Espejo Göbel.

### B.2.10 INTERACCIONES DE LA ENERGÍA EN LA ATMÓSFERA

El efecto neto de la atmósfera varía con estas diferencias en la longitud de la trayectoria y también varía con la magnitud de la señal de energía que está siendo detectada, las condiciones atmosféricas presente, y las longitudes de onda involucradas. Figura B.1 Estos efectos son causados principalmente por medio de los mecanismos interacción atmosférica, que son absorción, transmisión y *scattering* (Wim H. Bakker 2009)



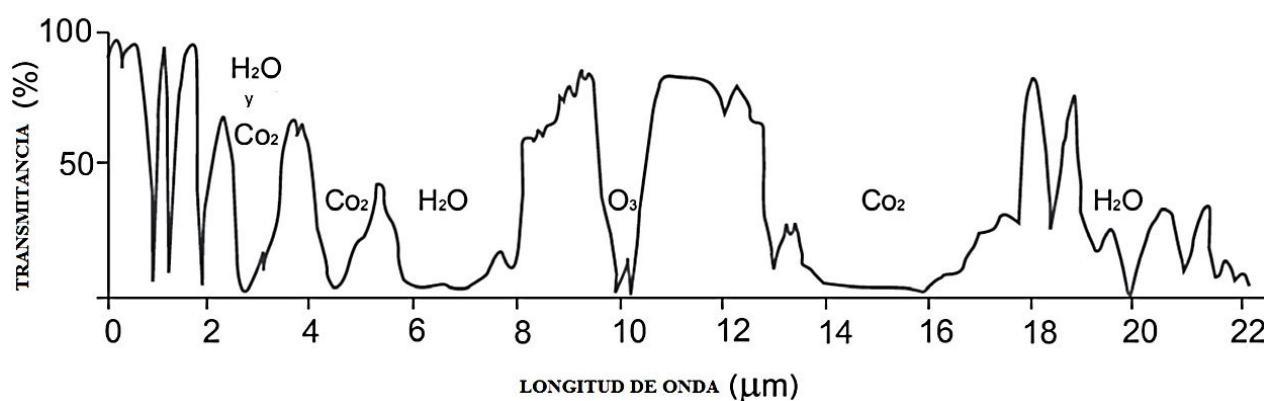
**Figura B.13** Interacciones energéticas. Modificado de Wim H. Bakker et., al, 2009, pp. 70

La Figura B.13 muestra un esquema de las Interacciones de energía que ocurren en la atmósfera y en la superficie de la Tierra. Se observa que para que el sensor detecte la

energía del Sol que es reflejada por la superficie de la Tierra existe muchas radadication que interfieren en este proceso.

### B.2.11 LA ABSORCIÓN Y LA TRANSMISIÓN

La energía electromagnética que viaja a través de la atmósfera es absorbida en parte por diversas moléculas. Los absorbentes más eficiente de la radiación del sol en la atmósfera son el ozono ( $O_3$ ), vapor de agua ( $H_2O$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). (Wim H. Bakker 2009. p.71)

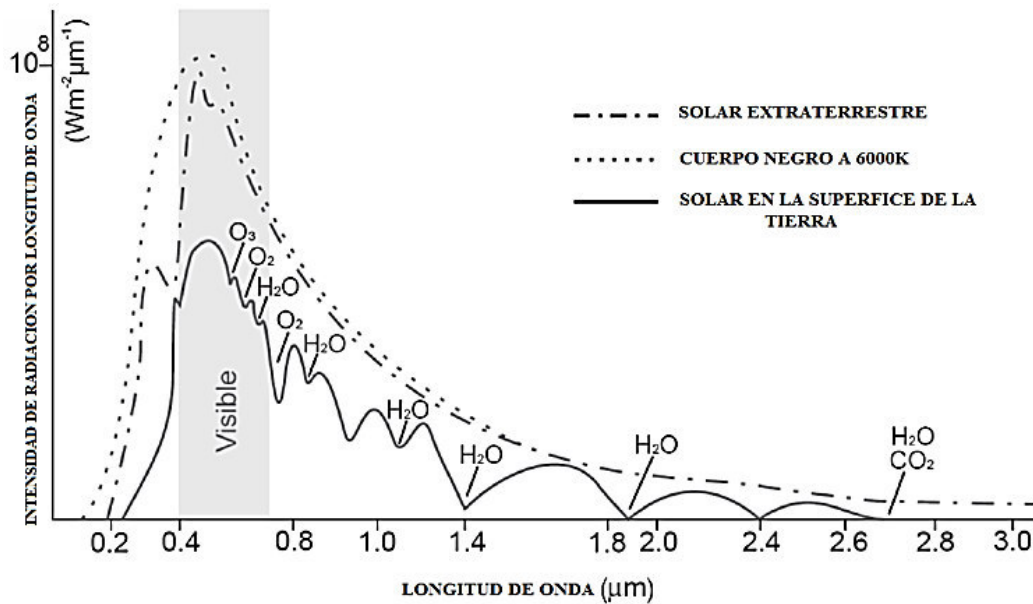


**Figura B.14.** Transmitancia atmosférica. Modificado de Wim H. Bakker et al., 2009, pp. 71

La Figura B.14 proporciona una representación esquemática de la transmisión atmosférica en el rango de longitud de onda 0 a la 22  $\mu m$ . Se puede observar que muchas de las longitudes de onda no son útiles para la teledetección de la superficie de la Tierra, simplemente porque la energía correspondiente puede ingresar a la atmósfera. Solamente las porciones del espectro fuera de las gamas principales de absorción de la atmósfera los gases pueden ser utilizados para la teledetección. Los intervalos útiles se conocen como las ventanas de transmisión atmosféricas e incluyen:

La ventana de 0,4 a 2  $\mu m$ . La radiación en este rango (visible, NIR, SWIR) se refleja principalmente la energía. Debido a que este tipo de radiación sigue las leyes de la óptica, a los sensores remotos que operan en este rango a menudo se les llama ópticos. Tres ventanas en el rango TIR, es decir, dos ventanas estrechas alrededor 3 y 5  $\mu m$ . Y una tercera ventana relativamente amplia, que se extiende desde aproximadamente 8 a 14  $\mu m$ . La radiación solar, como se observa tanto con y sin la influencia de la Tierra del ambiente, se muestra en

la Figura B.15, la radiación solar medida fuera de la atmósfera se asemeja a la radiación del cuerpo negro a 6000 K. La medición de la radiación solar en la superficie de la Tierra muestra que la distribución espectral de la energía radiada desde el sol es muy desigual. Se indican la absorción por diferentes gases en la atmósfera (Wim H. Bakker et., al, 2009. p. 73)

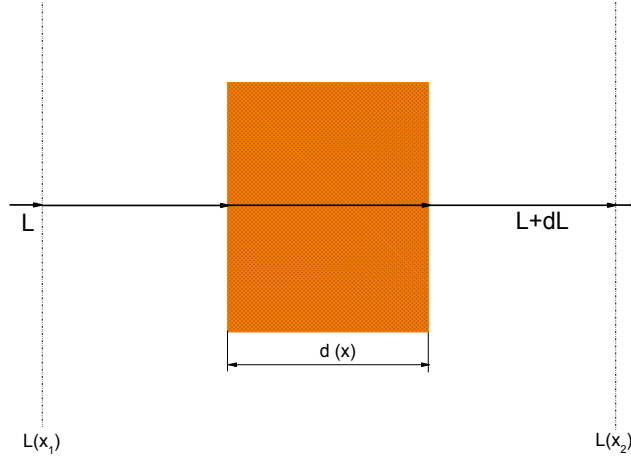


**Figura B.15.** Curvas de radiación del Sol y de un cuerpo negro a la temperatura del sol. Modificado de Wim H. Bakker et., al, 2009, pp. 73

Figura B.15 muestra las Curvas de radiación del Sol y de un cuerpo negro a la temperatura 600 K, las gráficas representan la intensidad de la radiación por longitud de onda.

**La Absorción.** Si una radiación se propaga el interior de un cuerpo, según la Figura B.16, el cuerpo presenta un ancho de  $dx$  que es perpendicular a la dirección de propagación de la radiancia  $L$ . Es frecuente que al interior del objeto la energía radiante presenta pérdidas que son ocasionadas por conversión en otras formas de energía y luego de atravesar una longitud  $dx$  la radiancia pasara a  $L + dL$ , (Sobrino, 2000)

$$dL = -\sigma_a L dx \quad \text{A.49}$$



**Figura B.16.** Definición de Absorción. Modificado de Sobrino, 2000

La Figura B.16 muestra en esquema simplificado de la definición de absorción, en el interior del objeto existe pérdidas de energía.

Con la ayuda de la ecuación (A.49) se define el coeficiente de absorción volumétrico,  $\sigma_a$ , cuya dimensión es  $m^{-1}$ . Al realizar el recorrido entre  $x_1$  y  $x_2$ , si integramos la Ecuación (A.49) nos da

$$L(x_2) = L(x_1) \exp(-\delta_a) \quad A.50$$

con

$$\delta_a = \int_{x_1}^{x_2} \sigma_a(x) dx \quad A.51$$

Aquí  $\delta_a$  es el espesor óptico de absorción comprendido desde  $x_1$  a  $x_2$ . El espesor óptico es una cantidad que no tiene dimensión. El espesor óptico en un medio homogéneo es el producto que resulta del camino geométrico multiplicado por el coeficiente de absorción.

La Ecuación A.51 es la ley de Beer (Sobrino, 2000).

La transmisividad,  $\tau$ , entre  $x_1$  y  $x_2$  en la dirección de propagación está definida según

$$\tau = \frac{L(X_2)}{L(X_1)} = \exp(-\delta_a) \quad A.52$$

A partir de la  $\tau$  si la radiancia se calcula para  $x_1$  y para  $x_2$ , el  $\delta_a$  se se obtiene según

$$\delta_a = -\ln \tau = \ln \frac{L(X_1)}{L(X_2)} \quad A.53$$



Luego para la energía radiante que no pudo es transmitida quedara absorbida, luego absorptividad de entre  $x_1$  y  $x_2$  será:

$$\alpha = \frac{L(X_1) - L(X_2)}{L(X_1)} = 1 - \tau \quad \text{A.54}$$

Si están presentes la absorción, transmisión y los procesos de reflexión, se tiene

$$\rho + \sigma + \tau = 1 \quad \text{A.55}$$

con  $\rho$  como la reflectividad de la superficie definida como el cociente entre el flujo de energía que refleja el material y el flujo de energía que incide inicialmente sobre el material.

## B.2.12 EL SCATTERING

Para una capa se puede escribir según (Sobrino, 2000):

$$dL = -\sigma_s L dx \quad \text{A.56}$$

siendo  $\sigma_s$  el coeficiente volumétrico cuya dimensión es  $\text{m}^{-1}$ . El espesor óptico del “scattering” sera:

$$\delta_s = \int_{x_1}^{x_2} \sigma_s(x) dx \quad \text{A.57}$$

En la ecuación (A.52) se definió la transmisividad, si se realiza un cambio intercambiando a  $\delta_a$  y por  $\delta_s$ , sea un elemento diferencial volumen  $dv$  distinguiendo el rayo que incide por su irradiancia  $E$  en el  $dv$ . Luego el flujo radiante que sufre scattering por  $dv$  hacía una dirección  $\mathbf{n}$  con un ángulo  $\theta$  medido en la dirección de incidencia  $\mathbf{n}_0$  al interior de un ángulo sólido  $d\Omega$  esta expresado según:

$$d^2\phi = f(\theta) E dv d\Omega \quad \text{A.58}$$

con  $f(\theta)$  que tiene dimensiones de  $\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ , se denomina la función de scattering, que distingue a la distribución angular de los fotones que son dispersados. El plano que es definido por la direcciones de incidencia  $\mathbf{n}_0$  y “scatteing”  $\mathbf{n}$  es el plano de dispersión, con  $\theta$  como ángulo de “scattering”.

Integrando la ecuación (A.58) se obtiene El flujo total perdido debido al sobre  $d\Omega$  en todas direcciones. El flujo incidente  $\phi$  en el  $dv$  varia una cantidad  $\phi + d\phi$ , luego

$$d\phi = -Edv \iint_{\text{espacio}} f(\theta) d\Omega \quad \text{A.59}$$

Sea el elemento volumen  $dv$  generado por un área  $dS$  que es perpendicular a la dirección de incidencia con un grosor  $dx$ , tal que  $dv = dSdx$ , luego tenemos que el flujo incidente es  $\phi = E.dS$  de la Ecuación (A.56) escrita para el flujo, se obtiene la disminución del flujo incidente según

$$d\phi = -\sigma_s \phi dx = -\sigma_s E dv \quad \text{A.60}$$

Relacionando las ecuaciones (A.60) y (A.61) resulta

$$\sigma_s = \iint_{\text{espacio}} f(\theta) d\Omega \quad \text{A.61}$$

Siendo esta la relación que existe entre la función de “scattering” y el coeficiente de “scattering”, por otro lado incluyendo la función de fase normalizada  $p(\theta)$ , según

$$p(\theta) = \frac{4\pi}{\sigma_s} f(\theta) \quad \text{A.62}$$

mediante la ecuación (A.61), la normalización será

$$\iint_{\text{espacio}} p(\theta) d\Omega = 4\pi \quad \text{A.63}$$

También

$$\int_0^\pi p(\theta) \sin\theta d\theta = \int_{-1}^{+1} p(\mu) d\mu = 2 \quad \text{A.64}$$

La densidad de las partículas no influye en la función de fase, pero las características de las partículas si influyen sobre la función de fase.

### B.2.13 ABSORCIÓN Y “SCATTERING”

Normalmente los procesos de absorción y “scattering” ocurran de forma simultánea, el coeficiente de extinción,  $\sigma_e$  expresa la atenuación de la energía radiante en un medio, el  $\sigma_e$  se expresa mediante la suma de los coeficientes de absorción y “scattering” (Jiménez, 2005):

$$\sigma_e = \sigma_a + \sigma_s \quad \text{A.65}$$

También el espesor óptico total,  $\delta$ , es

$$\delta = \delta_a + \delta_s \quad \text{A.66}$$

El albedo de “scattering” simple,  $\varpi$ , caracteriza la importancia relativa de los procesos de “scattering” y absorción, el  $\varpi$  se expresa según

$$\varpi = \frac{\sigma_a}{\sigma_s}, \quad 1 \geq \varpi \geq 0 \quad \text{A.67}$$

que genera:

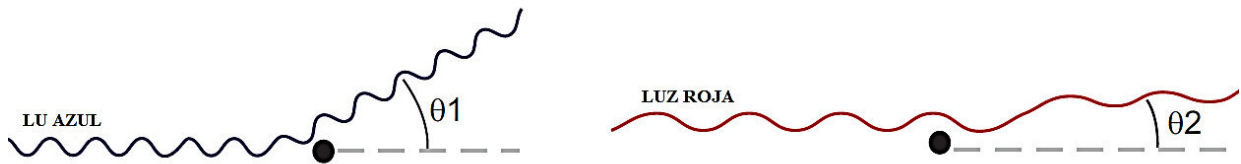
$$\sigma_s = \varpi \sigma_e \quad \text{A.68}$$

$$\sigma_a = (1 - \varpi) \sigma_e \quad \text{A.69}$$

Si  $\varpi = 1$  expresa un caso conservativo, no existe pérdida de la energía radiativa. Pero,  $\varpi = 1$  no existe, tan sólo es una aproximación en medios que tienen pequeña absorción, y esta aproximación se debe ejecutar cuidadosamente, si en un múltiple “scattering” nos lleva a recorridos muy largos. Ahora para valores mínimos de  $\varpi$  son los casos en la cual el “scattering” es despreciable frente a la absorción, para valores mayores que cero. El “scattering” por partículas, así como la absorción por medios sólidos o líquidos, tiene variaciones pequeñas con la longitud de onda, pero en el caso de gases tienen un espectro de absorción muy complicado (Jiménez, 2005)

#### B.2.14. LA “SCATTERING” DE RAYLEIGH

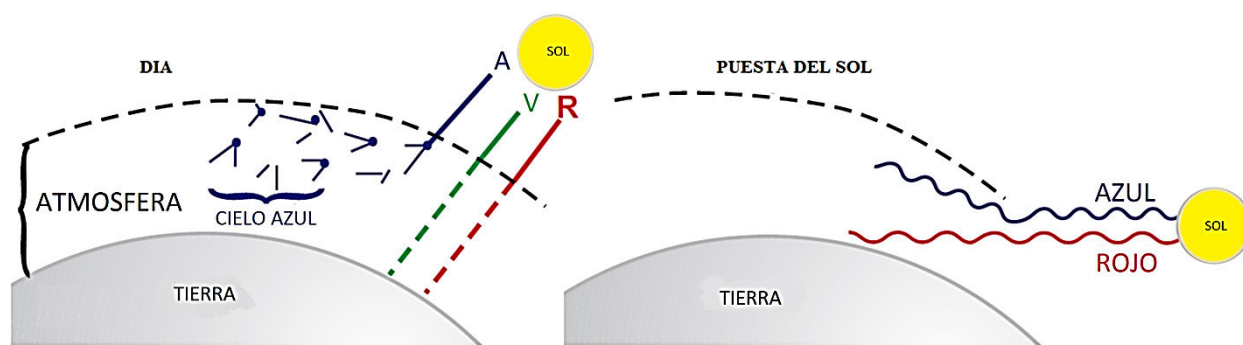
Domina donde la radiación electromagnética interactúa con partículas que son más pequeñas que las longitudes de onda de la luz. Ejemplos de estas son pequeñas partículas de polvo, y de óxido denitrógeno ( $NO_2$ ) y moléculas de oxígeno ( $O_2$ ). Luz de longitud de onda más corta (azul) se dispersa más de longitud de onda más larga luz (rojo), Figura B.17 (Wim H. Bakker et., al, 2009. p. 74)



**Figura B.17.** La “scattering” de Rayleigh es causada por partículas más pequeñas que la longitud de onda (línea roja) y es máxima para las pequeñas longitudes mínimas (línea azul). Modificado de Wim H. Bakker et., al, 2009, pp 74

La Figura B.17 muestra un esquema que representa el “scattering” de Rayleigh, se observa que cuando una onda incide o interactúa con cuerpos de tamaño menor su longitud de onda (línea roja) y el “scattering” de Rayleigh es máximo para longitudes de onda mínimas (línea negra).

En ausencia de las partículas y la “scattering”, el cielo parecería negro. Durante el día la energía solar viaja la distancia más corta a través de la atmósfera la “scattering” Rayleigh provoca un cielo claro para ser observado como azul. Al amanecer y al atardecer, la luz del Sol se desplaza una distancia más larga a través de la atmósfera de la Tierra antes que nos lleguen. Toda la radiación de longitudes de onda más cortas se dispersa después de una cierta distancia y sólo las longitudes de onda más largas lleguen a la superficie de la Tierra. Como resultado, hemos No se ve un cielo azul, pero una naranja o rojo (Figura B.18). (Wim H. Bakker et., al, 2009. p. 75)



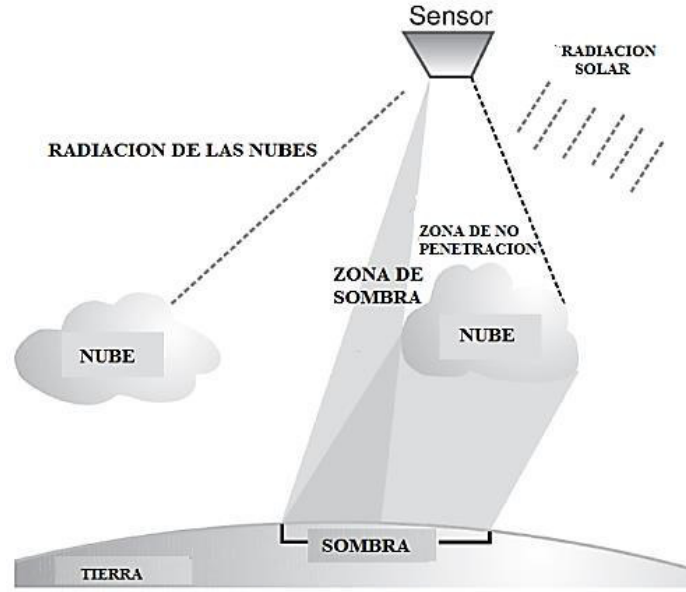
**Figura B.18** El “scattering” de Rayleigh nos hace percibir un cielo azul durante el día y un cielo rojo al atardecer. Modificado de Wim H. Bakker et., al, 2009, pp. 75

La Figura B.18 muestra un ejemplo del “scattering” de Rayleigh que permite visualizar el cielo de diferentes colores según el recorrido de las ondas al interactuar con la atmósfera. En el día se observa que la atmósfera interactúa con las longitudes de onda correspondiente al color azul, por consiguiente se aprecia un cielo azul (imagen izquierda); en el amanecer y en la puesta del Sol la atmósfera interactúa con las longitudes de onda correspondientes al rojo y al azul, como resultado de esta interacción se observa un cielo de color naranja o rojo

El “scattering” de Rayleigh perturba la información de la teledetección en el rango espectral visible desde gran altura. Esto causa una distorsión de las características espectrales de la luz reflejada en comparación con las mediciones realizadas sobre el terreno: debido a la “scattering” de Rayleigh las longitudes de onda más cortas están sobreestimados. En las fotos en color tomadas desde grandes alturas, representa el azul de estas imágenes. En general, la “scattering” de Rayleigh disminuye la "nitidez" de fotos y por lo tanto reduce su interpretabilidad. Del mismo modo, la “scattering” de Rayleigh tiene un efecto negativo sobre la clasificación digital utilizando datos de los sensores multiespectrales. (Wim H. Bakker et., al, 2009. p. 75)

#### **B.2.15 “SCATTERING” DE MIE**

Se produce cuando la longitud de onda de la radiación EM es similar en tamaño a las partículas atmosféricas. La causa más importante de la “scattering” de Mie son aerosoles: una mezcla de gases, vapor de agua y el polvo. La “scattering” de Mie se restringe generalmente a la atmósfera inferior, donde las partículas más grandes son más abundantes y domina en condiciones nubladas. “scattering” de Mie influye en el rango espectral del ultravioleta cercano hasta el infrarrojo medio, y tiene un mayor efecto sobre la radiación longitudes de onda más largas que de la “scattering” de Rayleigh, “scattering” no selectiva, se produce cuando el tamaño de partícula es mucho mayor que la longitud de onda de radiación. Las partículas típicas responsables de este efecto son las gotas de agua y las partículas de polvo más grandes. La “scattering” no selectiva es independiente de la longitud de onda dentro de la gama óptica. El ejemplo más prominente del “scattering” no selectivo es el que vemos en las nubes como cuerpos blancos. Una nube se compone de gotitas de agua; ya que dispersan la luz de cada longitud de onda igual, aparece una nube blanca. Un sensor remoto como nuestro ojo no puede "ver a través" nubes. Además, las nubes tienen un efecto que limita aún más la teledetección ópticas: nubes proyectan sombras (Figura B.19). (Wim H. Bakker et., al, 2009. p. 76)



**Figura B.19.** Los efectos directos e indirectos de las nubes en la teledetección óptica. Modificado de Wim H. Bakker et., al, 2009, pp. 77

Figura B.19 muestra, esquemáticamente, Los efectos directos e indirectos de las nubes sobre los detectores de los sensores en la teledetección óptica. Además las zonas de sombra y las zonas de penetración

#### B.2.16 INTERACCIONES DE LA RADIACIÓN PROVENIENTE DEL SOL CON LA ATMOSFERA Y LA SUPERFICIE TERRESTRE

En el efecto de “scattering”, se asume que la superficie presenta reflectancia lambertiana, que la atmósfera es homogénea en el plano horizontal y varía verticalmente en capas paralelas. Los satélites miden de la reflectancia equivalente  $\rho_b^*$  la cual se define de la siguiente forma (Vermote et al., 2006)

$$\rho_b^* = \frac{\pi d^2 L_b}{E_s^b \mu_s} \quad A.70$$

$L_b$  = Radiancia medida en el satélite integrado en la banda espectral  $b$  ( $Wm^{-2}$ ),

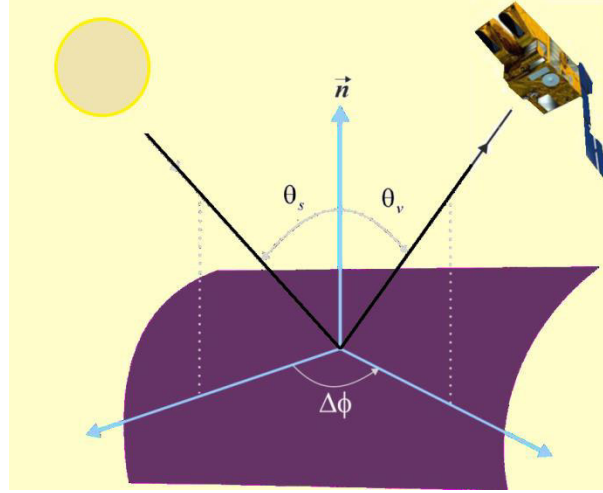
$E_s^b$  = Irradiancia exoatmosférica solar en la parte alta de la atmósfera integrado en la banda espectral  $b$  ( $Wm^{-2}$ ),

$d$  = Distancia de la Tierra al Sol, en unidades astronómicas,

$\mu_s = \cos\theta_s$  es el coseno del ángulo cenit del Sol

$\theta_s$  es el ángulo cenit del Sol.

La dirección de visión se describirá con el ángulo cenit de visión  $\theta_v$  y el ángulo acimut de visión  $\phi_v$ , y los ángulos del Sol como el ángulo cenit del Sol  $\theta_s$  y el ángulo acimut del Sol  $\phi_s$  Figura. B.20



**Figura B.20.** Angulos, Modificado de *Rahman and Dedieu*, 1994

La Figura B.20 muestra, esquemáticamente, las direcciones de los ángulos:  $\theta_s$  ángulo cenit del Sol,  $\theta_v$  ángulo cenit de visión,  $\Delta\phi$  acimut relativo y  $\vec{n}$  la normal de la superficie incidente.

A continuación muestran las interacciones de la radiación del Sol con la atmosfera y la superficie terrestre. (*Vermote et al.*, 2006)

1. La atenuación del flujo de radiación hacia abajo por la atmósfera terrestre  $E_{sol}^{dir}$

$$E_{sol}^{dir} = \mu_s E_s e^{\frac{-\tau}{\mu_s}} \quad A.71$$

$\tau$  es el espesor óptico atmosférico, ecuación A.72, es un coeficiente de atenuación de la intensidad de radiación.  $e^{\frac{-\tau}{\mu_s}}$  es la transmitancia directa y se obtiene al normalizar la iluminación directa.

2. El flujo de radiación difusa hacia abajo  $E_{sol}^{dif}$ ; es independiente de las condiciones de la superficie, definida por el factor de transmitancia difusa ( $\theta_s$ ):

$$td(\theta_s) = \frac{E_{sol}^{dif}}{\mu_s E_s} \quad A.72$$

3. Otro flujo de radiación difusa resultante de un efecto de trampa (referencia); esta depende del ambiente que rodea al objetivo compuesta por múltiples reflejos y “scattering” entre la atmósfera y la superficie, si

$S$  = albedo esférico de la atmósfera se representa y  $\rho_0$  = reflectancia del objetivo,

Luego se puede escribir como:

$$\left[ e^{\frac{-\tau}{\mu_s}} + td(\theta_s) \right] [\rho_0 + \rho_0^2 S^2 + \dots] \quad A.73$$

La expresión A.73 se puede simplificar mediante una serie geométrica según:

$$[\rho_0 + \rho_0^2 S^2 + \dots] = \frac{1}{1 - \rho_0 S} - 1 \quad A.74$$

Sea la transmitancia:

$$T(\theta_s) = e^{\frac{-\tau}{\mu_s}} + td(\theta_s) \quad A.75$$

y se suman los tres términos, la iluminación total normalizada a nivel superficial resulta:

$$\frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_0 S} \quad A.76$$

A nivel satélite, la radiancia detectada resulta de:

1. La contribución de la radiación solar total (directa + difusa), reflejada por la superficie y transmitida directamente al satélite, expresada como transmitancia directa:

$$e^{\frac{-\tau}{\mu_v}}, \text{ con: } \mu_v = \cos \theta_v \quad A.77$$

2. La radiancia intrínseca atmosférica, en función de reflectancia, denominada reflectancia de trayectoria:

$$\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) \quad A.78$$

3. La contribución ambiental que refleja el flujo total (directo + difuso) hacia abajo, los fotones llegan al sensor mediante “scattering” por la atmosfera:

$$t'_a(\theta_v) \quad A.79$$

Si  $(\theta_s)$  y  $t'_a(\theta_v)$  se asumen idénticas, la reflectancia aparente a nivel del satélite sera:

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + T(\theta_s)T(\theta_v) \frac{1}{1 - \rho_0 S} \quad A.80$$



donde : 
$$T(\theta_v) = e^{\frac{-\tau}{\mu_v}} + t_d(\theta_v) \quad A.81$$

Interacciones de los fotones con la atmósfera y la superficie terrestre, Figura B.21. En la parte superior se encuentran las tres componentes de la iluminación de la superficie, mientras que en la parte inferior se muestran los componentes de reflectancia medidos por el sensor del satélite.

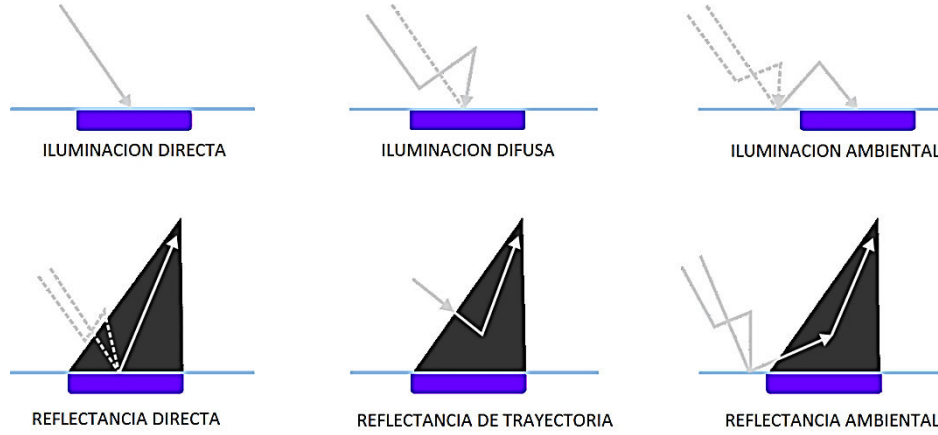


Figura B.21 Efectos atmosféricos sobre la superficie. Modificado de *Vermote et al.*, 2006

La Figura B.21 muestra los efectos atmosféricos en la iluminación de la superficie y reflectancias medidas en el satélite. Se observa las interacciones por iluminación directa, iluminación difusa, iluminación ambiental; reflectancia directa, reflectancia de trayectoria y la reflectancia ambiental.

Si la reflectancia de la superficie no es uniforme, entonces consideramos un pequeño objeto  $M$  de reflectancia  $\rho_c(M)$  con un entorno uniforme de reflectancia ambiental  $\rho_e(M)$ . Luego la ecuación A.81 queda:

$$\begin{aligned} \rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) \\ = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_0 S} \left[ \rho_c(M) e^{\frac{-\tau}{\mu_v}} + \rho_e(M) t_d(\theta_v) \right] \quad A.82 \end{aligned}$$

Al considerar el efecto de la absorción gaseosa al introducir la transmisividad de los gases, la ecuación A.82 queda:

$$\begin{aligned}
\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) \\
= t_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) \right. \\
\left. + \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_0 S} \left[ \rho_c(M) e^{\frac{-\tau}{\mu_v}} + \rho_e(M) t_d(\theta_v) \right] \right\} \quad A. 83
\end{aligned}$$

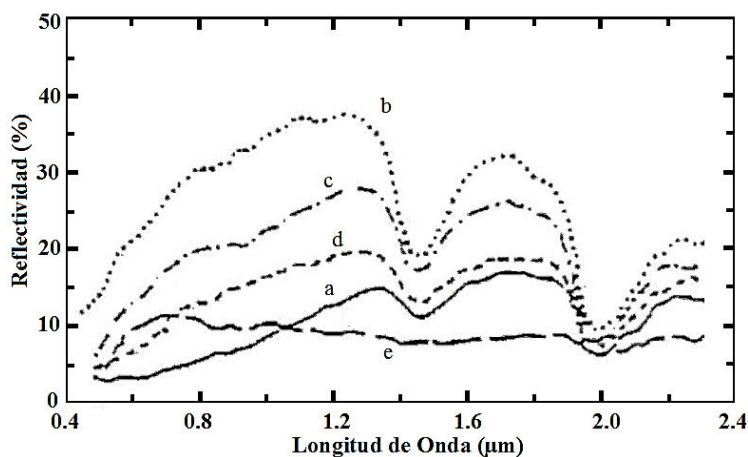
Al despejar ( $\rho_c$ ) de la ecuación (A.83) se obtiene la reflectancia en la superficie terrestre del objeto de interés.

$$\rho_c = \frac{\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) - \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) t_g(\theta_s, \theta_v)}{t_g(\theta_s, \theta_v) \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_0 S} (M) e^{\frac{-\tau}{\mu_v}}} - \frac{\rho_e(M) t_d(\theta_v)}{(M) e^{\frac{-\tau}{\mu_v}}} \quad A. 84.$$

### B.2.17 REFLECTIVIDAD DE LOS SUELOS

Las características de reflectancia espectral de los suelos, Figura B.22, son el resultado de sus propiedades físicas y químicas además son influenciados en gran medida por la naturaleza de la composición de los suelos, en la cual los componentes principales son sólidos inorgánicos, materia orgánica, aire y agua. Según la **Composición química**: el contenido en óxido de hierro y materia orgánica influye en el color del suelo y en su reflectividad. Para la **Textura**, el porcentaje de arena, limo y arcilla, determina la capacidad de retención de agua. La reflectividad es mayor para suelos más finos y apelmazados. En presencia de **Rugosidad** la mayoría de los factores se hallan relacionados: i) suelo arcillosos (poco permeable y de textura fina, tiende a tener alto contenido en humedad lo que implica una reflectividad baja, ii) suelo arenoso (muy permeable y de textura grosera, tiende a tener bajo contenido en humedad) por lo tanto una alta reflectividad. Si existe **contenido de humedad**, los suelos generalmente son menos brillantes (menor reflectividad) que los suelos secos (Gandía, 1991). En las regiones visibles y del infrarrojo cercano que se extienden a  $10 \mu m$  las transiciones electrónicas relacionadas con hierro son el factor principal que determina el reflectancia espectral del suelo. La mayoría de absorción características de diagnóstico para la composición mineral se producen en la porción infrarroja de onda corta (SWIR) del espectro de longitudes de onda que van desde  $2,0$  hasta  $2,5 \mu m$ . Por otra parte, la absorción de silicatos laminares tales como arcillas y micas y también de carbonatos se producen en la región SWIR. La materia orgánica influye en las propiedades de reflectancia espectral de los suelos debido a cantidades superiores a

2% se sabe que tienen un efecto de enmascaramiento sobre la reflectancia espectral reduciendo así la reflectividad general del suelo y la reducción de las características de absorción (a veces de un oscurecimiento completo). Así suelos con una cantidad elevada (> 20%) de los compuestos orgánicos aparecen oscuros en todo el rango de 0,4 a 2,5  $\mu\text{m}$ . En contraste, los suelos menos descompuestos tienen una mayor reflectancia en la región del infrarrojo cercano y características de absorción mejoran. Características de absorción prominentes cerca de 1.4 y 1.9  $\mu\text{m}$  es debido a estar junto o no al agua, estas características de absorción de agua menos prominentes se pueden encontrar en 0,97, 1,20 y 1,77  $\mu\text{m}$ , el aumento de contenido de humedad en general disminuye la reflectancia del suelo. Algunos estudios sobre las características de reflectancia espectral de los suelos y los intentos de hacer clasificaciones se pueden encontrar en (Baumgardner, M, 1985; Condit, H. R., 1970; Stoner, E. R. y Baumgardner.1981; Singh, R. P. y Sirohim A. 1994).



**Figura B.22.** Características de reflectancia espectral de los suelos. (Sobrino, 2000).

La Figura B.22 muestra los espectros representativos de cinco suelos minerales: a) alto contenido en materia orgánica y fina textura, b) bajo contenido en materia orgánica y bajo contenido en hierro, c) bajo contenido en materia orgánica, contenido medio de hierro, d) alto contenido orgánico, grado de textura medio, e) alto contenido en hierro, textura fina (Sobrino, 2000).

### **B.2.18 REFLECTIVIDAD DE LA VEGETACIÓN**

Los estudios de reflectancia de la vegetación generalmente están restringidos a la parte de la hoja verde de las plantas, estas proporcionan poca atención a los componentes de la vegetación seca no verdes. (Gates, D. M., et al., 1965) Las propiedades de reflectancia de la vegetación en la parte visible del espectro están dominados por las propiedades de absorción de los pigmentos fotosintéticos de la clorofila, que tiene absorciones a 0,66 y 0,68  $\mu m$  para la clorofila a y b, respectivamente son los más importante. Los cambios en la concentración de clorofila producen desplazamientos espectrales del borde de absorción cerca de el borde rojo 0.7  $\mu m$ . Este borde rojo se desplaza hacia la parte azul del espectro con la pérdida de la clorofila. La reflectividad de la parte infrarroja del infrarrojo medio y de onda corta del espectro de la vegetación está dominada por el agua y los compuestos orgánicos de los cuales la celulosa, lignina, almidón y proteína (Elvidge, C. D., 1990). Las características de absorción debido al agua unido y no unido ocurre cerca de 1.4 y 1.9 y a 0,97, 1,20 y 1.77  $\mu m$  , la celulosa tiene absorciones a 1,22, 1,48, 1,93, 2,28, 2,34 y 2,48  $\mu m$ , mientras que la lignina tiene características de absorción a 1.45, 1.68, 1.93, 02.05 a 02.14, 2,27, 2,33, 2,38, y 2.48  $\mu m$  (Elvidge, C. D., 1990). El almidón tiene características de absorción a 0,99, 1,22, 1,45, 1,56, 1,70, 1,77, 1,93, 2,10, 1,32, y 2.48  $\mu m$  (Elvidge, C. D., 1990). La proteína más abundante en hojas es un compuesto que lleva nitrógeno que tiene características de absorción a 1,50, 1,68, 1,74, 1,94, 2,05, 2,17, 2,29y 2.47  $\mu m$  (Elvidge, C. D., 1990). materiales vegetales secos carecen de las absorciones de clorofila y absorciones de agua intensos, y por lo tanto carecen de la banda de absorción intensa producida por las altas absorciones azul y UV. materiales vegetales secos tienen características de absorción de lignocelulosa en la región 2,09 y el 2,30  $\mu m$  (Elvidge, C. D., 1990). Más detalles sobre las propiedades de reflectancia de materiales de plantas se pueden encontrar en *Wessman, C. et., all.* (1988)

### **B.3 TELEDETECCIÓN BASADOS EN DATOS LANDSAT**

A continuación se presenta algunas características generales de las imágenes misiones e imágenes Landsat usadas en el presente trabajo

#### **B.3.1 MISIONES LANDSAT 4, 5, 7 y 8**

Misiones Landsat 4 y 5 tenían el instrumento histórico MSS, para proporcionar continuidad de los datos, y un nuevo instrumento *Thematic Mapper* (TM) para reemplazar la RBV. TM aumentó las bandas de frecuencia disponibles a partir de los cuatro con MSS a siete, dando una banda de onda azul junto a una banda de ondas IR y TIR adicionales; Además, la digitalización aumentó de 6 a 8 bits. TM tenía un tamaño de píxel de 30 m para las bandas de onda reflectantes y 120 m para la banda de onda TIR, aunque estos datos se remuestrean a un tamaño de píxel de 30 m para hacer el manejo de los datos más fácil, pero en realidad no mejorar la resolución espacial. (Lavender, Lavender, 2016, 33)

Landsat 7 tiene un instrumento *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) con los mismos seis bandas de onda de reflexión del TM con un tamaño de píxel de 30 m, con una banda de onda TIR a 60 m remuestreado a la resolución óptica de datos de 30 m. Este instrumento también tiene una banda de ondas pancromática a los 15 m de resolución. La digitalización de los datos aumenta de nuevo a 9 bits. (Lavender, Lavender, 2016, 33)

Landsat 8 lleva tanto *Operational Land Imager* (OLI) y *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) a bordo. OLI tiene ocho bandas de onda de reflexión, siete del ETM+, junto con una tercera banda de infrarrojos, con un tamaño de píxel de 30 metros y una banda de ondas pancromática a los 15 m. TIRS contribuye con dos bandas de onda TIR con una resolución espacial de 100 m, resampled a un tamaño de píxel de 30 m. La digitalización también se ha mejorado de nuevo, a 16 bits, lo que resulta en imágenes con más de 65.000 niveles de gris. (Lavender, Lavender, 2016, p 33). Para obtener más información visualizar la web del USGS (<http://landsat.usgs.gov/> fecha de acceso 20/4/2015)

### **B.3.2. DIFERENTES NIVELES DE DATOS DISPONIBLES**

A continuación se hace una descripción de los cuatro niveles de procesamiento de las imágenes Landsat (Lavender, Lavender, 2016, p 34)

**Nivel 0 (L0).** Se refiere a los datos en bruto. Estos son los datos recibidos desde el satélite simplemente convertido en un formato adecuado para el almacenamiento.

**Nivel 1 (L1).** Los datos son los datos L0 que han sido transformados en formatos que sean más accesibles a los usuarios, tales como imágenes.

**Nivel 2 (L2).** Añade una serie de parámetros geofísicos derivados tales como altura de las olas del océano, la humedad del suelo, o la concentración de hielo. Para los sensores ópticos, la L1 a L2 procesamiento incluiría una corrección atmosférica.

**Nivel 3 (L3).** Son conjuntos de datos compuestos que grandes áreas, a menudo todo el mundo, están juntos en mosaico de múltiples órbitas

**Nivel 4 (L4).** Tienen un procesamiento adicional, tal como relleno de espacios a través de la interpolación o la combinación de los datos de varios sensores.

La imagen Landsat es una combinación de tres bandas de ondas espectrales separadas. A menudo se refiere como una imagen RGB a causa de su creación a partir de tres bandas de onda mostradas como RGB. (Lavender, Lavender, 2016, p 63)

La lista completa de las bandas de ondas espectrales por misión, junto con la información adicional y un resumen de las misiones Landsat, sus sensores, y las bandas de frecuencia del espectro se puede encontrar en la Tabla B.1. (Lavender, Lavender, 2016, p 64)

Misiones Landsat	Instrumento, sensor.	Espetro de Banda de Ondas (Longitud de Onda Cantral en nm)	Archivos Adicionales
1, 2, 3, 4, y 5	Multispectral Scanner (MSS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Green (550)</li> <li>• Red (650)</li> <li>• Two NIR (750 and 950)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metadata file (MTL.txt)</li> <li>• Ground Control Points File (GCP.txt)</li> <li>• Verify Image Files (VER.jpg and VER.txt)</li> <li>• README.txt</li> </ul>
4 and 5	Thematic Mapper (TM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Blue (490)</li> <li>• Green (560)</li> <li>• Red (660)</li> <li>• NIR (830)</li> <li>• Two SWIR (1670 and 2240)</li> <li>• TIR (11,500)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metadata file (MTL.txt)</li> <li>• Ground Control Points File (GCP.txt)</li> <li>• Verify Image Files (VER.jpg and VER.txt)</li> <li>• README.txt</li> </ul>
7	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Blue (485)</li> <li>• Green (560)</li> <li>• Red (66)</li> <li>• NIR (835)</li> <li>• Two SWIR (1650 and 2220)</li> <li>• TIR (11,450)</li> <li>• Panchromatic</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metadata file (MTL.txt)</li> <li>• README.txt</li> <li>• gap_mask folder and files within</li> </ul>
8	Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coastal aerosol (440)</li> <li>• Blue (480)</li> <li>• Green (560)</li> <li>• Red (655)</li> <li>• NIR (865)</li> <li>• Two SWIR (1610 and 2200)</li> <li>• Panchromatic</li> <li>• Cirrus (1370)</li> <li>• Two TIR (10,895 and 12,005)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metadata file (MTL.txt)</li> <li>• Band Quality Assessment (BQA.tif)</li> </ul>

**Tabla B.1.** Bandas de ondas espectrales que ofrecen las diferentes misiones Landsat y sensores (Lavender, Lavender, 2016, pp. 64)

La Tabla B.1 muestra todas las bandas de ondas espectrales que ofrecen las diferentes misiones Landsat , los sensores de cada Landsat, los rangos de longitud de onda central en nanómetros(nm), así como también los archivos adicionales que cuenta la imagen Landsat

Los datos L1 contienen una Variedad de número de archivos adicionales, que a su vez dependen de la misión (Lavender, Lavender, 2016, 64):

**Archivo MTL:** contiene los metadatos de procesamiento de datos y calibración aplicado a la escena.

**Archivo de GCP:** *Ground Control Points* (GCPs), puntos de control terrestre, que se utilizaron en la corrección geométrica, con los errores residuales para cada GCP siendo las diferencias entre el lugar y la posición conocida de acuerdo con la escena Landsat.

**README:** Contiene un resumen y una breve descripción de los archivos descargados.

**VER.jpg** (acompañado de un archivo .txt): muestra una cuadrícula de puntos de verificación con los colores para representar la precisión de la corrección geométrica. Carpeta de Gap\_mask de Landsat 7 archivos: contiene una imagen adicional para cada una de las bandas de ondas espectrales. Esto se atribuye a la falla de Landsat 7 de Corrector de Escaneo Lineal el 31 de mayo de 2003.

**BQA:** Archivo de Evaluación de Calidad de la banda que indica los píxeles que pueden haber sido afectados por factores externos; a partir del momento de escribir (julio de 2015), es sólo disponible para Landsat 8, pero hay planes para crear también para las otras misiones.

## **B.4 ANALISIS Y PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SATELITALES LANDSAT**

A continuación se expone la corrección geometría, calibración radiometría

### **B.4.1 CORRECCIÓN GEOMÉTRICA**

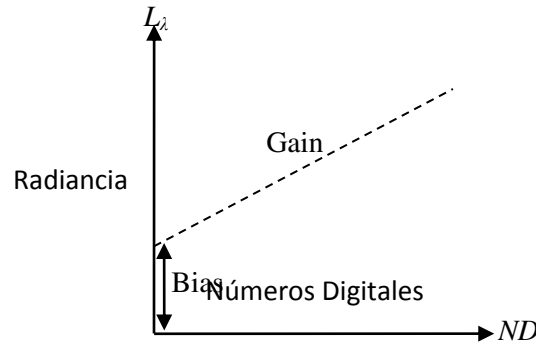
Las imágenes obtenidas por los sensores a bordo de los satélite Landsat ya se encuentran georreferenciadas. Para las imágenes descargadas en este trabajo presenta el tipo corrección geométrica (C.G) Productos de nivel 1 Terrain (L1T), los productos de datos L1T en productos con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas, emplean GCP para brindar una imagen registrada a una proyección cartográfica, referenciada a WGS84, G873. También contienen corrección topográfica debido al desplazamiento del terreno por la presencia de relieves. (Alexander, 2013).

### **B.4.2 CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA**

Luego de captar la imagen, se generan imperfecciones, alteraciones radiométricas debido a las características de la iluminación, las partículas presentes en la atmósfera, éstas imágenes deben ser corregidas radiométricamente con el fin de que sean válidas para que se pueda comparar con otras imágenes satelitales se son tomadas en de diferente fecha,. El más común de los procedimientos de corrección radiométrica selecciona los números digitales *ND* asociado a cada píxel y los convierte a valores de radiancia espectral. Todas las imágenes captadas de los sensores TM, ETM+ y OLI que se encuentran en los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 respectivamente, están compuestos de *ND*. Para convertir



los *ND* a rangos de radiancia espectral se necesita de los datos de la ganancia (*Gain*) y los datos de sesgo (*Bias*) que proporciona el sensor en cada banda. Estos datos son se encuentran en la información técnica que adjunta a cada imagen denominada *header*. El *Gain* es la pendiente de la recta de calibración, Figura B.23 y el *Bias* corresponde la radiancia espectral del sensor cuando el *ND* es cero. (Markham y Barker, 1986)



**Figura B.23.** Representación gráfica de  $L_{\lambda}$  Radiancia vs *ND*. (Markham y Barker, 1986)

La Figura B.23 muestra la representación gráfica de radiancia espectral,  $L_{\lambda}$ , en función a los números digitales *ND*.

El valor de radiancia espectral para cada pixel se calculó mediante la ecuación 4.1, propuesta por Markham y Barker (1986), en unidades  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ .

$$L_{\lambda} = Gain(ND) + Bias \quad A.85$$

El *Gain* sera:

$$Gain = \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{cal \max} - Q_{cal \min}} \quad A.86$$

El *Bias* por

$$Bias = L_{\min \lambda} - \left( \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{cal \max} - Q_{cal \min}} \right) Q_{cal \min} \quad A.87$$

de las ecuación A.86 y A.87 en A.85 tendremos:

$$L_{\lambda} = \left( \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{cal \max} - Q_{cal \min}} \right) (ND) + L_{\min \lambda} - \left( \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{cal \max} - Q_{cal \min}} \right) Q_{cal \min} \quad A.88$$

Agrupando la ecuación A.88 se obtiene:

$$L_{\lambda} = \left( \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{cal \max} - Q_{cal \min}} \right) (ND - Q_{cal \min}) + L_{\min \lambda} \quad A.89$$

La descripción de cada variable de la ecuación A.89 se presenta en la Tabla B.2

Descripción	Variable
Radiancia espectral ( $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ )	$L_\lambda$
Numero digital	$ND$
Es la radiancia espectral en la banda $\lambda$ correspondiente a $Q_{cal \max}$	$L_{\max \lambda}$
Es la radiancia espectral en la banda $\lambda$ correspondiente a $Q_{cal \min}$	$L_{\min \lambda}$
Es el nivel digital mínimo calibrado	$Q_{cal \min}$
Es el nivel digital máximo calibrado	$Q_{cal \max}$

**Tabla B.2.** Descripción de las variables que interviene en la radiancia espectral (Markham y Barker, 1986)

La Tabla B2 muestra un resumen de las variables de la educación A.89. en la Tabla encontramos las Radiancias espectrales, el Numero digital, los niveles digitales mínimo y máximo calibrados.

Para los datos procesados por la *National Landsat Archive Production System* (NLAPS)  $Q_{cal \min} = 0$  y  $Q_{cal \max} = 255$  y para los datos procesados por *Level 1 Product Generation System* (LPGS)  $Q_{cal \min} = 1$  y  $Q_{cal \max} = 255$ .

## B.5 REFLECTANCIA PLANETARIA EN EL TECHO DE LA ATMOSFERA (TOA) DE TM, ETM+ y OLI

Según Williams, (2004) la radiancia espectral de las imágenes TM y ETM+ se convierten en reflectancia según:

$$\rho_p = \frac{\pi \times L \times d^2}{ESUN_\lambda \times \cos \theta} \quad A.90$$

$\rho_p$ : Es la reflectancia planetaria.

$L$ : es la radiancia espectral en la apertura del sensor.

$d$  : Es la distancia Tierra- Sol, que puede ser calculada a través de la ecuación A.90

$d_n$  : Es el día del año.

$ESUN_\lambda$  : Es la irradiancia exoatmosférica solar promedio de cada banda.

$\theta$  : Es el ángulo cenital solar.

$$d = (1 - 0.01672x \cos(\text{RADIAN}(0.9856x(d_n - 4))))^2 \quad \text{A.91}$$

La radiancia espectral de las imágenes OLI se convierte a valores de reflectancia (TOA), (Alexander, 2013). usando los coeficientes de reflectancia reescalados, que se encuentran en el archivo de metadatos MTL, según

$$\rho_\lambda = M_\rho Q_{cal} + A_\rho \quad \text{A.92}$$

$\rho_\lambda$  : Valor de reflectancia planetaria;

$M_\rho$ : Factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (reflectance\_mult\_band\_x, donde x es en número de la banda)

$A_\rho$ : Factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (reflectance\_add\_band\_x, donde x es el número de la banda)

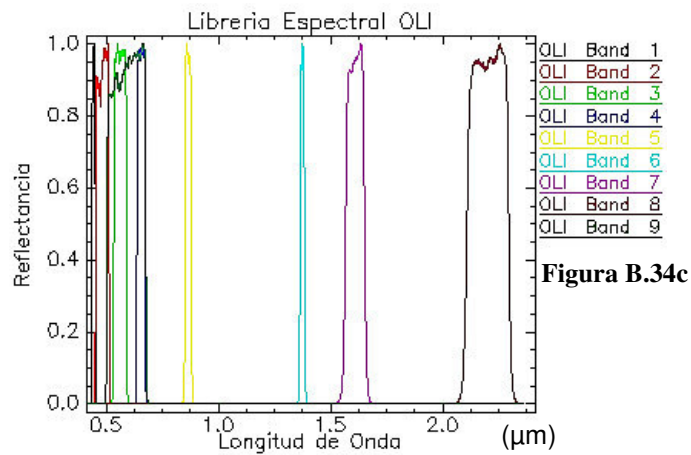
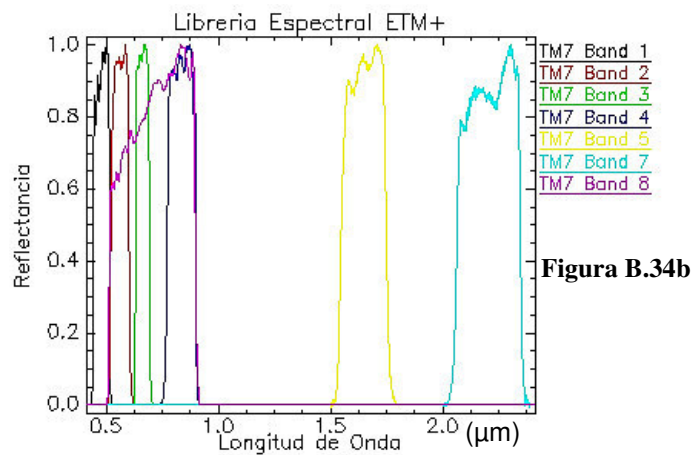
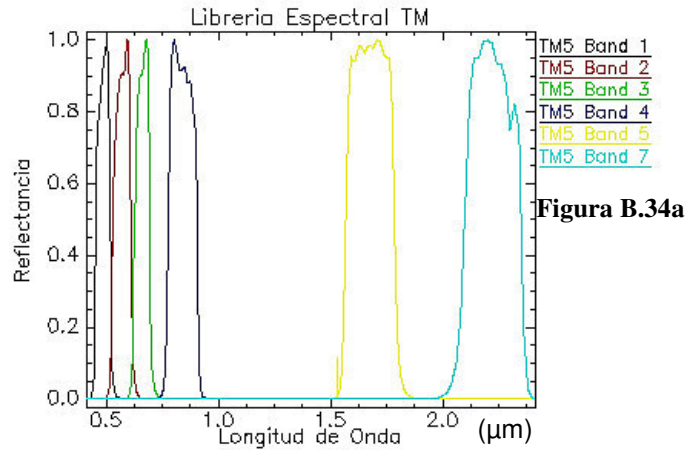
$Q_{cal}$ : Producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN).

## **B.6. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA EN EL ESPECTRO VISIBLE USANDO FLAASH**

El método *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH)* es un método de corrección atmosférica que presenta el modelo de Transferencia Radiativa MODTRAN4. Este modelo obtiene primero la radiancia espectral de un pixel. (Kaufman, Wald, et al; 1997)

### **B.6.1 LIBRERÍA ESPECTRAL PARA LOS SENSORES TM, ETM+ Y OLI**

El módulo FLAASH utiliza las funciones de Respuesta Espectral Relativa (“Relative Spectral Response” (RSR)) que consiste en librerías espectrales tomadas para los sensores de un satélite antes que fueran lanzadas, Figura B.24, <http://speclab.cr.usgs.gov/>



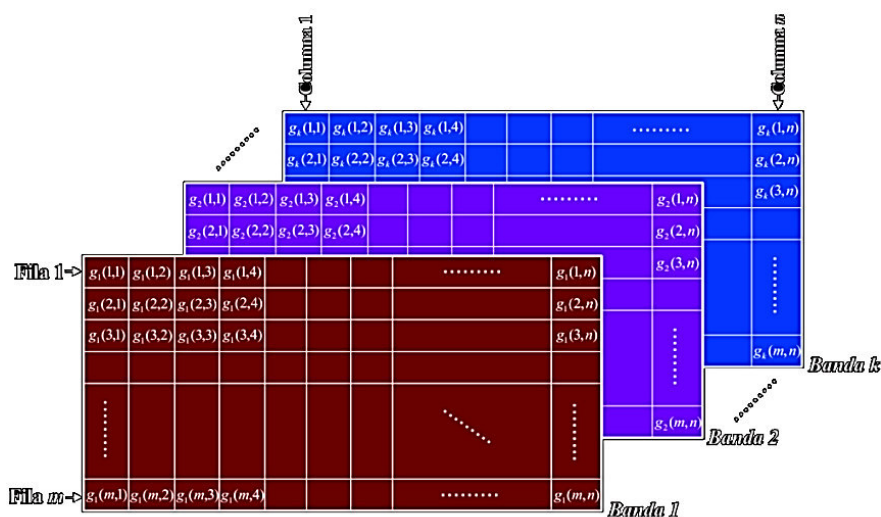
**Figura B.24.** Librería espectral de los sensores, (a)TM, (b) ETM+ y (c) OLI

La Figura B.24 muestra la librería espectral de los sensores TM, ETM+ y OLI, que son adquiridos de la página web <http://speclab.cr.usgs.gov/> (fecha de acceso 20/03/2015), cada sensor tiene diferentes número de bandas.

Cada sensor posee una sensibilidad espectral diferente, descrita por sus funciones RSR. (Forestier et al., 2009). Las funciones RSR en el módulo FLAASH es llamado “Filter Function”.

### B.6.2. FORMATOS DIGITALES DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

Una imagen multispectral puede representarse como una matriz de tres dimensiones de valor de escala gris o como intensidad de pixel ( $n$ ), donde  $n$  número de columnas del pixel,  $m$  número de filas del pixel y  $k$  representa número de bandas (Sobrino, 2000) Figura B.25



**Figura B.25.** Figura espectral. Modificado, Sobrino, 2000.

La Figura B.25 muestra una representación esquemática de una imagen multispectral que está representada en tres dimensiones, desde la fila 1 hasta la fila  $n$ , desde la columna 1 hasta la columna  $n$  y desde la banda 1 hasta la banda  $n$ .

Una imagen que no ha sido procesada, codifican la información de los ND en 8 bits, por lo que admiten un rango de  $2^8=256$  byte, tal que  $0 \leq g_k \leq 255$  (Sobrino, 2000). Este es el caso de las imágenes TM, ETM+ y OLI. Pero las imágenes luego de ser procesadas pueden almacenarse en byte, integer, floating point, pudiendo ser negativos e incluso valores complejos.

### B.6.3 FORMATOS DE BANDAS

**Formato de bandas intercaladas por pixel, “Band Interleaved by Pixel” (BIP).** A continuación se ilustra en la Figura B.26.

$g_1(1,1)$	$g_2(1,1)$	...	$g_k(1,1)$	$g_1(2,1)$	$g_2(2,1)$	...	$g_k(2,1)$	...	$g_1(m,1)$	$g_2(m,1)$	...	$g_k(m,1)$
$g_1(1,2)$	$g_2(1,2)$		$g_k(1,2)$	$g_1(2,2)$	$g_2(2,2)$		$g_k(2,2)$		$g_1(m,2)$	$g_2(m,2)$		$g_k(m,2)$
$\vdots$			$\vdots$	$\vdots$			$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$			$\vdots$
$g_1(1,n)$	$g_2(1,n)$	...	$g_k(1,n)$	$g_1(2,n)$	$g_2(2,n)$	...	$g_k(2,n)$	...	$g_1(m,n)$	$g_2(m,n)$	...	$g_k(m,n)$

**Figura B.26.** Formato de bandas de tipo BIP. Modificad de Canty, 2010.

La Figura B.26 muestra una representación esquemática del formato de bandas de tipo BIP. Los datos son almacenados un mismo pixel en todas las bandas antes de pasar al siguiente pixel, se ilustra en la siguiente (Sobrino, 2000)

**Formato de bandas intercaladas por líneas “Band Interleaved by Line” (BIL).** A continuación se ilustra en la Figura B.77

$g_1(1,1)$	$g_1(2,1)$	...	$g_1(m,1)$
$g_2(1,1)$	$g_2(2,1)$		$g_2(m,1)$
...			...
$g_k(1,1)$	$g_k(2,1)$	...	$g_k(m,1)$
$g_1(1,2)$	$g_1(2,2)$	...	$g_1(m,2)$
$g_2(1,2)$	$g_2(2,2)$		$g_2(m,2)$
...			...
$g_k(1,2)$	$g_k(2,2)$		$g_k(m,2)$
...		...	...
$g_1(1,n)$	$g_1(2,n)$	...	$g_1(m,n)$
$g_2(1,n)$	$g_2(2,n)$		$g_2(m,n)$
...			...
$g_k(1,n)$	$g_k(2,n)$	...	$g_k(m,n)$

**Figura B.27** Formato de bandas de tipo BIL. Modificad de Canty, 2010.

La Figura B.27 muestra una representación esquemática del formato de bandas de tipo BIL. Los datos se graban una línea en todas las bandas sucesivamente, y a continuación se pasa a la segunda línea, tercera, etc. (Sobrino, 2000)

**Formato de bandas secuenciales “*Band Sequential*” (BSQ).** A continuación se ilustra en la Figura B.28

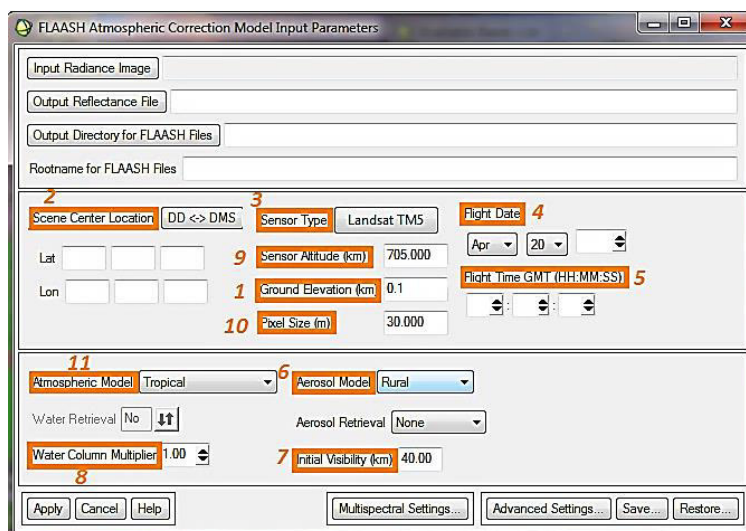
$g_1(1,1)$	$g_1(2,1)$	...	$g_1(m,1)$
$g_1(1,2)$	$g_1(2,2)$		$g_1(m,2)$
$\vdots$			$\vdots$
$g_1(1,n)$	$g_1(2,n)$	...	$g_1(m,n)$
$g_2(1,1)$	$g_2(2,1)$	...	$g_2(m,1)$
$g_2(1,2)$	$g_2(2,2)$		$g_2(m,2)$
$\vdots$			$\vdots$
$g_2(1,n)$	$g_2(2,n)$	...	$g_2(m,n)$
$\vdots$		...	$\vdots$
$g_k(1,1)$	$g_k(2,1)$	...	$g_k(m,1)$
$g_k(1,2)$	$g_k(2,2)$		$g_k(m,2)$
$\vdots$			$\vdots$
$g_k(1,n)$	$g_k(2,n)$	...	$g_k(m,n)$

**Figura B.28.** Formato de bandas de tipo BSQ. Modificad de Canty, 2010.

La Figura B.28 muestra una representación esquemática del formato de bandas de tipo BSQ. Los *ND* de cada banda se disponen uno a continuación de otro hasta completar la banda (Sobrino, 2000)

#### **B.6.4. PARÁMETROS QUE INGRESAN AL MÓDULO FLAASH**

En la Figura B.29 se muestra el módulo FLAASH del software ENVI 4.5 y en la Tabla B.3 los parámetros que se ingresan a este módulo:



**Figura B.29** Módulo FLAASH del software ENVI 4.5.

La figura B.29 muestra esquemáticamente (rectángulos naranjas) los parámetros necesarios para la corrección atmosférica del módulo FLAASH, en el software ENVI 4.5

	<b>Parámetros del módulo FLAASH</b>	<b>Datos (TM/ETM+)</b>
1	Elevación promedio del área de la imagen de entrada	2.5 km
2	Coordenadas del centro de la imagen de entrada	(344483.0028 E, 8743723.0729 N)
3	Tipo de sensor	TM, ETM+ o OLI
4	Fecha de la toma de la imagen de entrada	Según imagen usada
5	Tiempo de vuelo central de la imagen de entrada	Según imagen usada
6	Modelo de aerosol	Rural
7	Visibilidad	40 km
8	Condiciones de la columna de vapor de agua	1.00
9	Altitud del sensor	705 km
10	Tamaño del pixel de la imagen de entrada	30 m
11	Modelo atmosférico	Tropical

**Tabla B.3.** Parámetros que ingresan al módulo FLAASH.

La Tabla B.3 muestra los parámetros que se ingresan para el módulo FLAASH, en la Tabla se encuentran parámetros como: Elevación promedio del área de la imagen de entrada, Coordenadas del centro de la imagen de entrada, Tipo de sensor, Fecha de la toma de la imagen de entrada, entre otros parámetros necesarios.



## Anexo C

### PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS MEDIDOS

#### C.1.1 TEMPERATURA (T)

El incremento de la temperatura podrá tener consecuencias en los glaciares tropicales, y también los humedales alto andinos, en los ecosistemas y en la disponibilidad que es para el consumo humano, agricultura principalmente y para el riego (Urrutia y Vuille, 2009; Hoffmann, 2012; Painter, 2007; Soruco et al., 2009).

#### C.1.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (EC)

Está definida como la capacidad que tiene una solución acuosa de conducir una corriente eléctrica, que generalmente se expresa en mmhos/cm o en mSiemens/m; o el orden dSiemens/m a 25°C. Es una propiedad de las soluciones relacionada con el clase y valencia de los iones, la concentraciones total y relativa, su movilidad, la temperatura del líquido y su contenido de sólidos disueltos. La medida de conductividad eléctrica es una forma indirecta de medir la salinidad del agua o extractos de suelo (Vázquez y Bautista, 1993)

Categoría del suelo	Valor (mmhos/cm o dS/m)
No salino	0 - 2.0
Poco salino	2.1 - 4.0
Moderadamente salino	4.1 - 8.0
Muy salino	8.1 - 16.0
Extremadamente salino	> 16.0

**Tabla C.1** Criterios para evaluar la salinidad de un suelo, con base en su conductividad. Modificado de Vázquez y Bautista, 1993.

La Tabla C.1 muestra los criterios para evaluar la salinidad de un suelo, con base en su conductividad., en la cual se muestra los rangos de las categorías de suelo: No salino, Poco salino, Moderadamente salino, Muy salino y Extremadamente salino (Vázquez y Bautista, 1993)

### C.1.3 CONTENIDO VOLUMETRICO DE AGUA (VWC)

Entre algunas propiedades el contenido de agua en el suelo favorece la lixiviación de sales y de algunos otros compuestos; por lo tanto, el agua es un regulador importante de las actividades físicas, químicas y biológicas en el suelo (Topp, 1993).

El contenido de agua en el suelo, humedad de los suelos, cambia permanentemente a veces el cambio es notable en el tiempo y en el espacio, también ejerce mucha influencia sobre otras propiedades y procesos físicos (Dirksen, 1999)

Para la medir de humedad de los suelos existen métodos indirectos y directos; unos son destructivos y otros no destructivos. Un método utiliza sensores eléctricos que son colocados en el suelo, conectada a sus cables al momento de medir. La dependencia de un parámetro físico del suelo del contenido de agua está teóricamente relacionada a los parámetros físicos de cada constituyente en la mezcla y de acuerdo a la relación entre ellos, siendo muy importante la calidad, estabilidad y consistencia de la calibración.

El **contenido volumétrico** de agua en el suelo, por sus siglas en inglés VWC, ( $\theta$ ) se expresa en términos de volumen del contenido de agua ( $V_w$ ) por volumen total de suelo ( $V_t$ ), (Brady y Weil, 2002)

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad B.1$$

### C.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA EL CÁLCULO DEL pH.

El pH es una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas). La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos ( $H^+$ ) que se da en la interface líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. El grado de acidez o alcalinidad de un suelo es determinado por medio de un electrodo de vidrio en un contenido de humedad específico o relación de suelo-agua, y expresado en términos de la escala de pH. El valor de pH es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno, que se expresa por números positivos del 0 al 14. Tres son las condiciones

posibles del pH en el suelo: la acidez, la neutralidad y la alcalinidad. Método Para la determinación del pH se utiliza el método potenciométrico (Willard et., al, 1974).

### **C.2.1 FUNDAMENTO PARA LA MEDIDA DEL pH**

El método potenciométrico o electroquímico para medir pH de un suelo es el más utilizado. Con este método se mide el potencial de un electrodo sensitivo a los iones  $H^+$  (electrodo de vidrio) presentes en una solución problema; se usa como referencia un electrodo cuya solución problema no se modifica cuando cambia la concentración de los iones por medir, que es generalmente un electrodo de calomelano o de  $Ag/AgCl$ . El electrodo, a través de sus paredes, desarrolla un potencial eléctrico. En la práctica se utilizan soluciones amortiguadoras, de pH conocido, para calibrar el instrumento y luego comparar, ya sea el potencial eléctrico o el pH directamente de la solución por evaluar. (Willard et., al, 1974).

### **C.2.2 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL pH.**

Para determinar el pH de los muestras tomadas en el río Chillón, primero se procedió a realizar el método de disolución 1:1, siguiendo el procedimiento del descrito Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima (2008)

Seguidamente se describe el procedimiento que se realizó para todas la muestras.

- 1) Inicialmente se midió 20 g. de la muestra, utilizando una balanza analítica con sensibilidad de:  $\pm 0,0001g$ .
- 2) Se midió 20 ml de agua desmineralizada en una probeta graduada.
- 3) En un vaso de precipitado de 50 ml se vertió los 20 mg de la muestra 1, enseguida se vierte los 20 ml del agua desmineralizada. Obteniendo una solución sin diluir
- 4) Con la ayuda de una bagueta se agita la solución obtenida en el paso 3, esto se debe realizar por un minuto
- 5) Luego de agitar por un minuto, se deja reposar la solución por 10 minutos
- 6) Pasado los 10 minutos, nuevamente se agita la solución durante un minuto.
- 7 Se deja reposar la solución por otros 10 minutos
- 8) Se agita la solución por un minuto más

- 9) Finalmente se deja reposar por 10 minutos.
- 10) La solución está lista para que se pueda medir el pH.

### **C.2.3.CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE MEDIDA.**

Antes de utilizar los equipos, es necesario que estos sean calibrados, se utilizó un equipo de medición de pH de la firma OAKTON. La calibración se realizó introduciendo individualmente el electrodo del equipo en los buffer de calibración de pH =10.00 (color azul), pH = 7.00 (color amarillo), y pH = 4.01 (color rojo). Luego se ajustó los valores obtenidos en el equipo con el valor del correspondiente al “buffer”, cabe señalar que después de cada calibración en un “buffer” en particular se debe lavar bien el electrodo del equipo para que no quede residuos del anterior buffer y así se pueda realizar correcta calibración. Los detalles del equipo de medición de la firma OKTON se encuentran en: <http://www.4oakton.com/proddetail.asp?action=next&seq=5&TotRec=9&parent=12> , fecha de acceso 12/9/2016

### **C.2.4 CÁLCULO DEL pH**

Una vez concluido el paso 10 del procedimiento, se procede a introducir el electrodo del equipo, ya calibrado, hay que tener presente que el electrodo sólo debe colocarse en la parte líquida de la solución, evitando que el electrodo choque con las sustancias sólidas presentes en la solución. En el equipo podrán observar dos medidas una es el pH y la temperatura. Una vez realizada una medida es necesario limpiar el electrodo y volver a medir y anotar. Esta operación se repitió tres veces. De esta forma se obtuvo un promedio de las lecturas, tanto de pH como de temperatura.

## **C. 3 ELIMINACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DE LAS MUESTRAS.**

Para realizar el análisis mineralógico mediante la técnica de DRX, se necesita eliminar la materia orgánica presente en los suelos de las muestras, ya que esta no permite que exista una buena resolución de los picos de difracción de rayos X, impidiendo la alineación de los pequeños granos de minerales de arcilla, y contrariamente permite el incremento de la reflexión de fondo de los difractogramas también perturba las propiedades físicas de los suelos. Todas las muestras fueron sometidas a la eliminación de materia orgánica mediante

el método de oxidación por peróxido de hidrogeno, siguiendo el procedimiento descrito en el Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima (2008). (Fuente: Elaboración propia)

- 1\_ Se colocó la muestra en un vaso de precipitado de 1000 ml que contenía 500 ml agua desmineralizada,
- 2\_ Seguidamente se agregó 250 ml de peróxido de hidrogeno, luego se llevó a una estufa y se elevó la temperatura se mantuvo hasta que el peróxido de hidrogeno hirviera.
- 3\_ Se agrega continuamente peróxido de hidrogeno a la solución, esto se realizó durante 12 horas,
- 4\_ El vaso de precipitado fue retirado de la estufa, y dejado en reposo para que las partículas, ya de materia orgánica, se asentara en el fondo del vaso
- 5\_ Con la ayuda de un papel de filtro se retiró el peróxido de hidrógeno sobrante
- 6\_ Se procedió a lavar la muestra resultante con abundante agua desmineralizada,
- 7\_ Se retiró el agua desmineralizada, utilizando también un papel de filtro
- 8\_ La muestra resultante, aun húmeda, es depositada en un vaso de precipitado de 100 ml
- 9\_ Se procede al secado de la muestra contenida en el vaso de precipitado de 100 ml, para esto se la lleva al horno a una temperatura constante de 60° durante cuatro días.
- 10\_ Finalmente se obtuvo la muestra libre de materia orgánica. Durante todo el procedimiento se trabajó en una cabina extractora de gases

#### **C.4 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA EN POLVO**

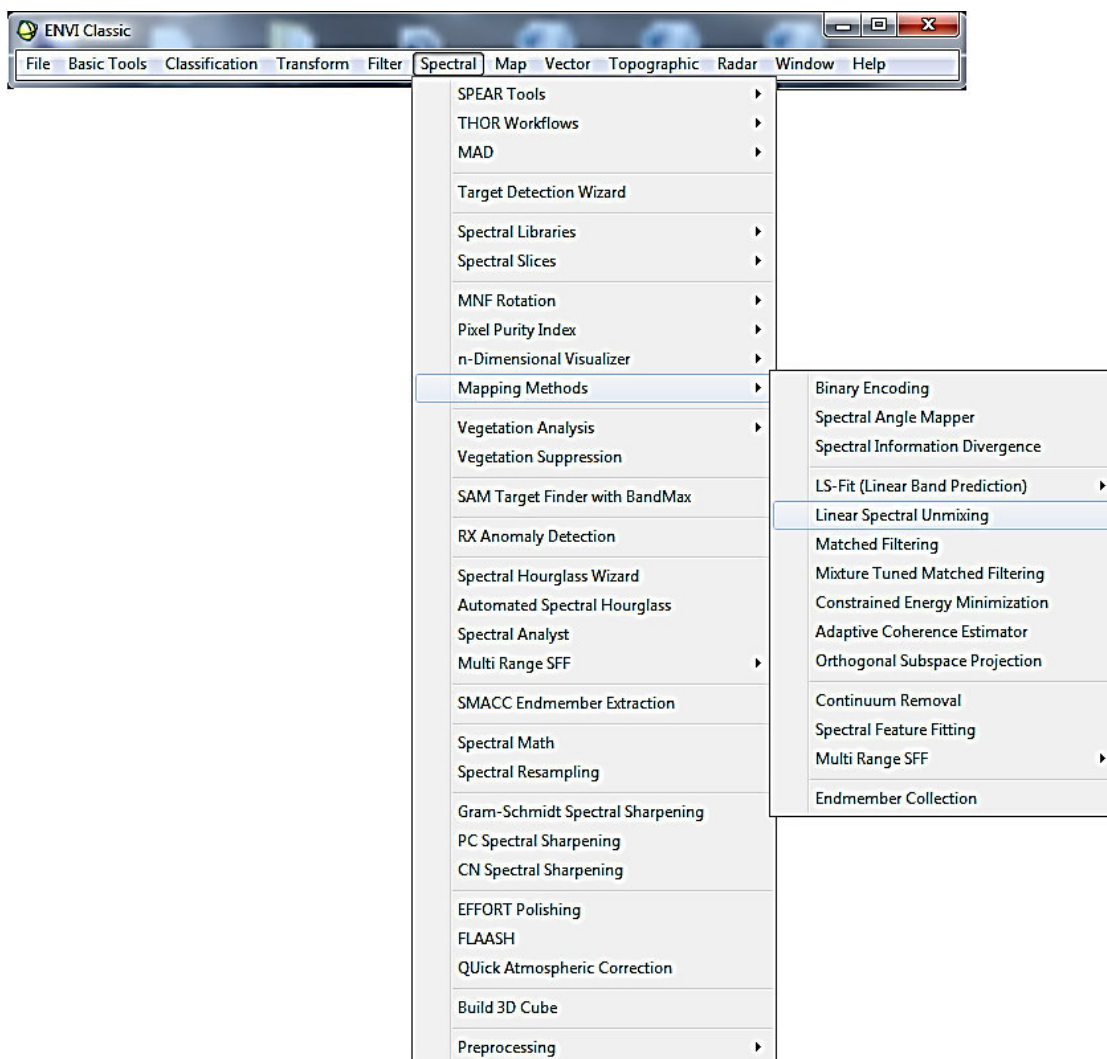
A continuación se exponen los pasos que se realizaron para la preparación de la muestra en polvo

- 1) Las muestras obtenidas en el proceso de la eliminación de la materia orgánica es sometida a una molienda con un mortero de ágata,
- 2) Se realizó el proceso de molienda hasta que la muestra se encuentre en polvo
- 3) Se procedió a depositar la muestra adecuadamente en el portamuestras del difractómetro de rayos X
- 4) Se lleva el porta muestra al equipo de difracción de rayos X.

## ANEXO D

### APLICACIÓN DEL MÉTODO LSU

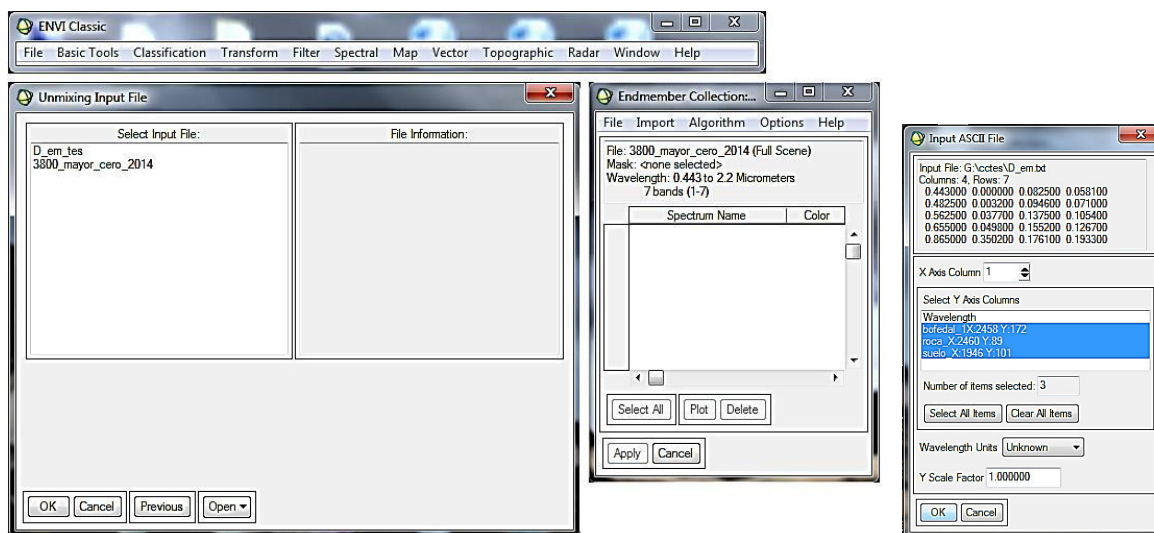
Seleccionado los ““endmember””, exportados y guardado a un archivo ASCII; se procederá a seleccionar el método de mapeo Linear spectral Unimixing (LSU) que se encuentra incorporado en el software ENVI. Figura. D.1



**Figura D.1.** Selección del método de mapeo Linear Spectral Unimixing , incorporado en el software ENVI.

La Figura D.1 muestra esquemáticamente los procedimientos a realizar para seleccionar y abrir del método de mapeo Linear Spectral Unimixing , incorporado en el software ENVI.

Seleccionado la del LSU se abrirán una ventana en la cual elegiremos hacia donde se va a aplicar, en nuestro caso será la cabecera de cuenca del río Chillo, que fue guardada con el nombre: 3800\_mayor\_cero\_2014. Seleccionado el archivo se generara otra ventana denominada ““endmember” Collección” en la cual importaremos nuestro archivo ASCII generado anteriormente, una vez abierta en la ventana “endmember” aparecerá los datos de los ““endmember”” bofedal, ““endmember”” roca, ““endmember”” suelo, aquí seleccionamos todo y se aplica, Figura D.2

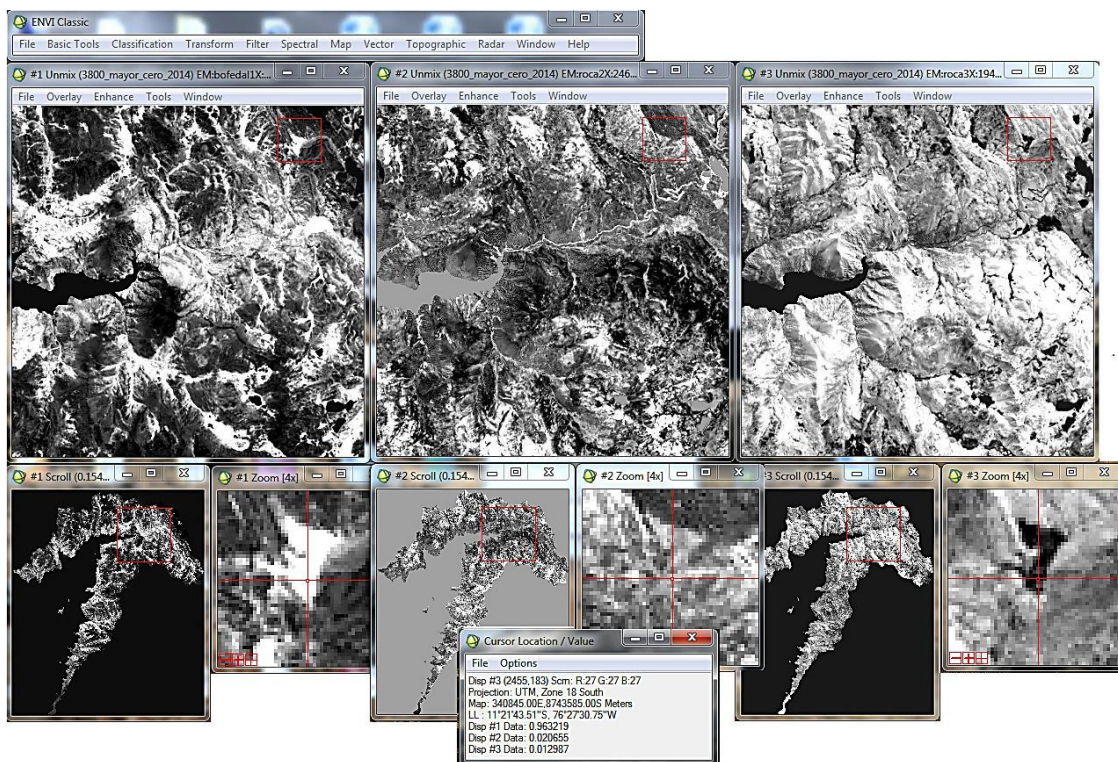


**Figura D.2.** Incorporación de los datos y pasos necesarios para la aplicación del LSU

La Figura D.2 muestra, esquemáticamente, la incorporación de los datos y pasos necesarios para la aplicación del LSU: En ventana de izquierda se carga la imagen a mapear, en ventana del centro se importan los “endmember” bofedal, “endmember” roca y “endmember” suelo, archivo ASCII. Con la ventana derecha, importados los “endmember”, y se aplica el método LSU.

Una vez cargado los “endmember” y aplicado el método de mapeo *LSU*, el software ENVI hace una clasificación basada en los “endmember”, podrá mostrar un conjunto de tres mapas, basada en el “endmember” bofedal, en el “endmember” roca y la otra en el endemember suelo. Si se visualizan los tres mapas a la vez, se observara que para cada pixels existirá una fracción de cada uno de los tres endemember Figura D.3 Los valores de las fracciones “endmember” para los pixeles que se encuentran al interior del bofedal Piloto están en los siguiente rangos, para la fracción de “endmember” bofedal tiene un

rango de 0.45 a 1, y la fracciones “endmember” roca y la fracciones “endmember” suelo, en este mismo pixel, tienen el valor próximos a 0.

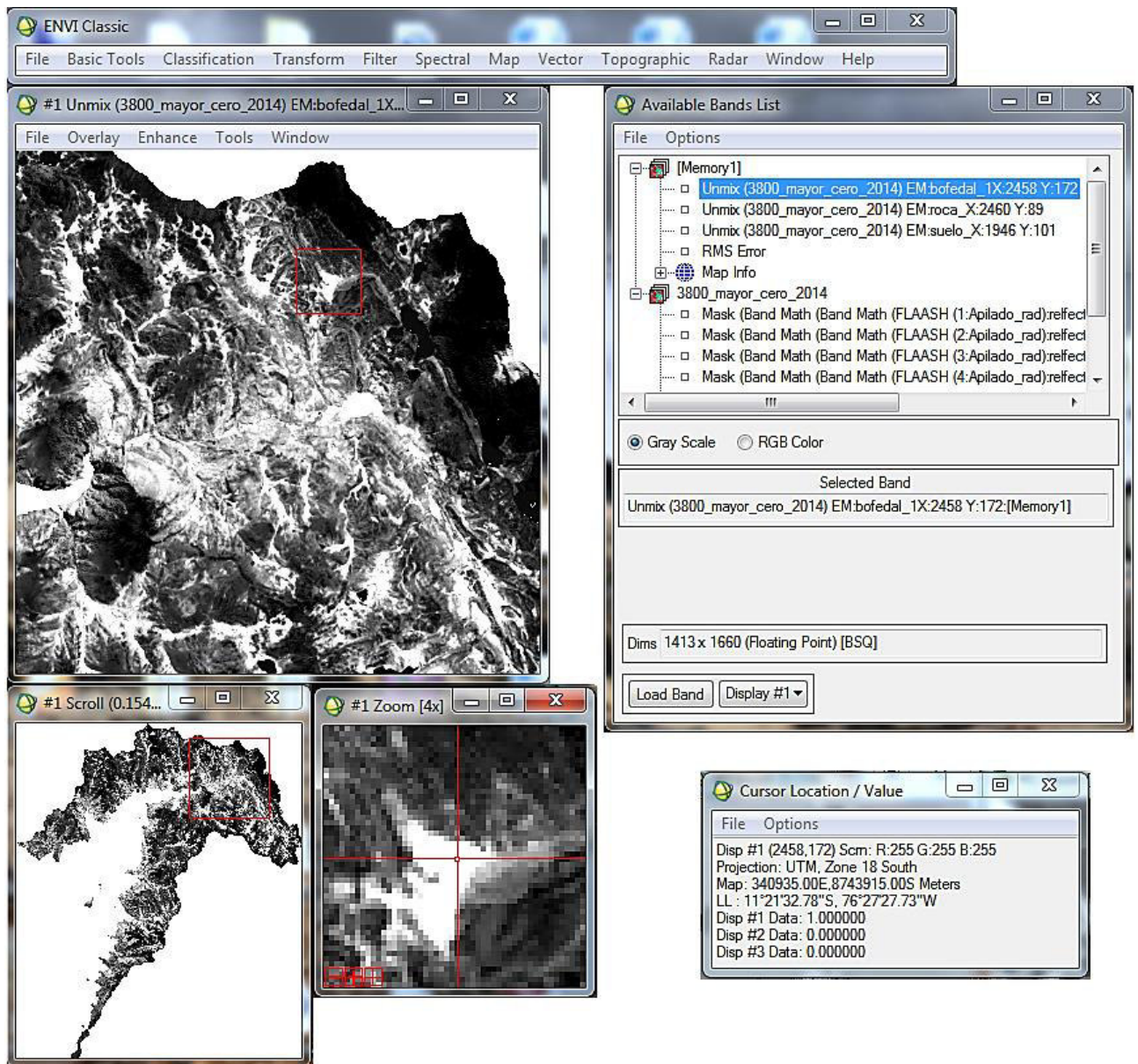


**Figura D.3** Mapeo aplicando el LSU. Fracciones “endmember” de un punto dentro del bofedal piloto.

La Figura D.3 muestra esquemáticamente la visualización simultánea los tres mapas generados por el LSU, se observara que para cada pixels existirá una fracción de cada uno de los tres endemenber (fracción “endmember” bofedal, fracción “endmember” roca y la fracción “endmember” suelo)

En un acaso particular, se muestra los valores de un pixles al interior del bofedal Piloto, Chunal, donde la fracción “endmember” bofedal tiene un valor 1, que es el pixel donde se encuentra el “endmember” bofedal usado para la clasificación, aquí la fracciones “endmember” roca y la fracciones “endmember” suelo tiene el valor 0. Figura D.4.





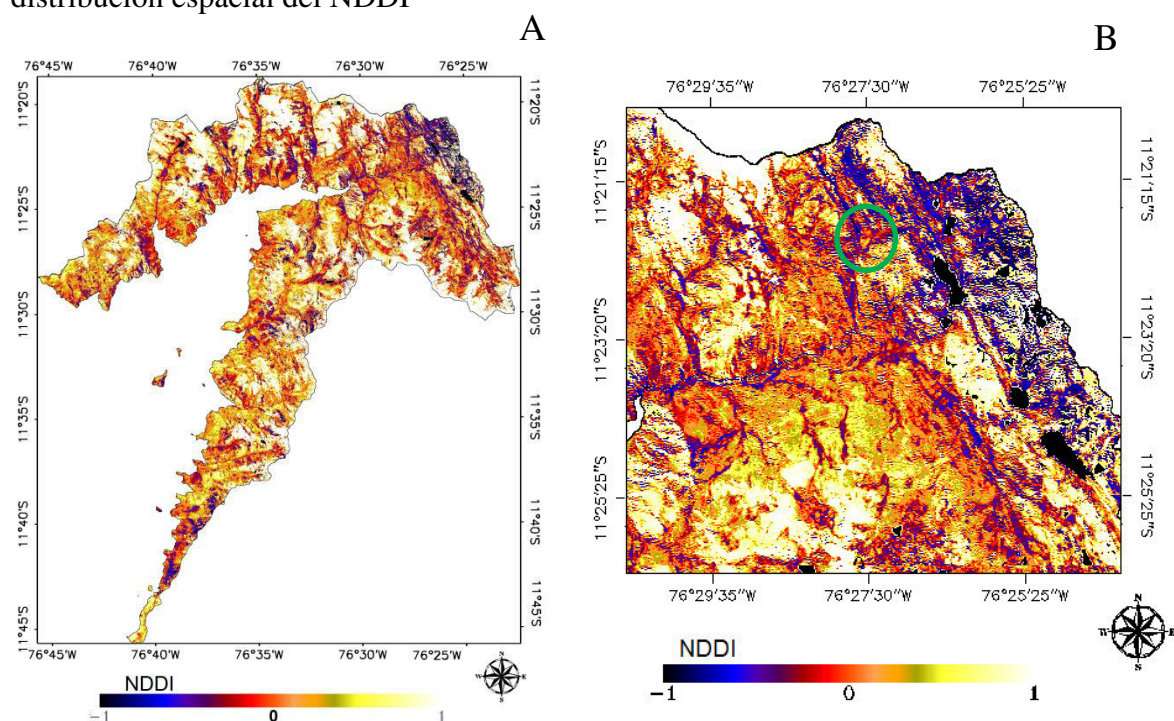
**Figura D.4.** Mapeo aplicando el LSU, el punto interior del bofedal piloto con valor de fracción de “endmember” bofedal igual a 1.00.

La Figura D.4 muestra el mapeo resultante al aplicando el LSU, como ejemplo se seleccionó un pixel en el interior del bofedal Piloto Chunal, con valor de fracción de “endmember” bofedal igual a 1.00 por consiguiente las demás fracciones de “endmember” son cero

## ANEXO E

### ÍNDICE DE SEQUÍA DIFERENCIA NORMALIZADA, NDDI.

En la Figura E.1 se presenta la distribución espacial del NDDI de la cuenca alta del río Chillón de la imagen OLI del 5 de julio del 2014, Landsat 8. Se generó un mapa de la distribución espacial del NDDI



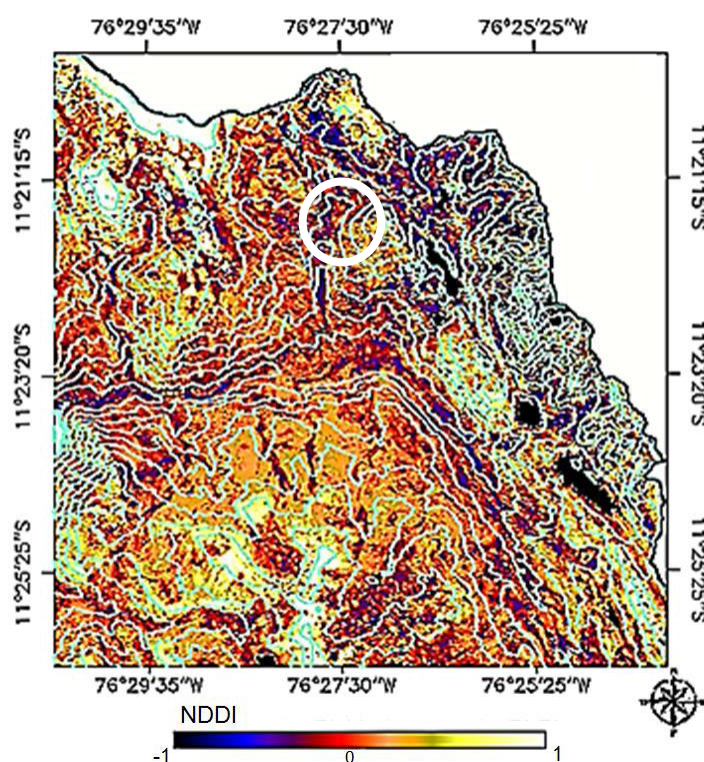
**Figura E.1** A) Distribución espacial del IDS, CRCH; B) IDS trabajos de campo

La Figura E.1 muestra que existen diferentes colores que probablemente muestren la escases o abundancia de agua; en la paleta presenta rangos desde -1 a 1 los rangos desde -1 a 0 es cuando el índice humedad es mayor que el índice de vegetación, no hay sequía, sino abundancia de agua o probablemente también corresponda a las zonas por donde el agua realiza su recorrido, esta característica corresponden a los colores que van desde negro, azul, hasta rojo; los rangos de 0 a 1 es cuando el índice de humedad del suelo es menor al índice de vegetación o probablemente también corresponda a las zonas por donde el agua no hace su recorrido, roca con poca vegetación roca sin vegetación, visualizados en los colores naranja verde claro amarillo y blanco respectivamente. La Figura E.1 B

corresponde a la zona del caso estudio de dimensiones 400 x 400 píxeles, el bofedal Piloto Chunal se muestra dentro de un círculo verde.

## NDDI Y CURVAS DE NIVEL

A continuación se presenta un mapa de distribución espacial del NDDI de las zonas cercas al bofedal piloto Chunal, encerrada en círculo blanco. Figura. E.2



**Figura E.2.** IDS trabajos de campo y curvas a nivel.

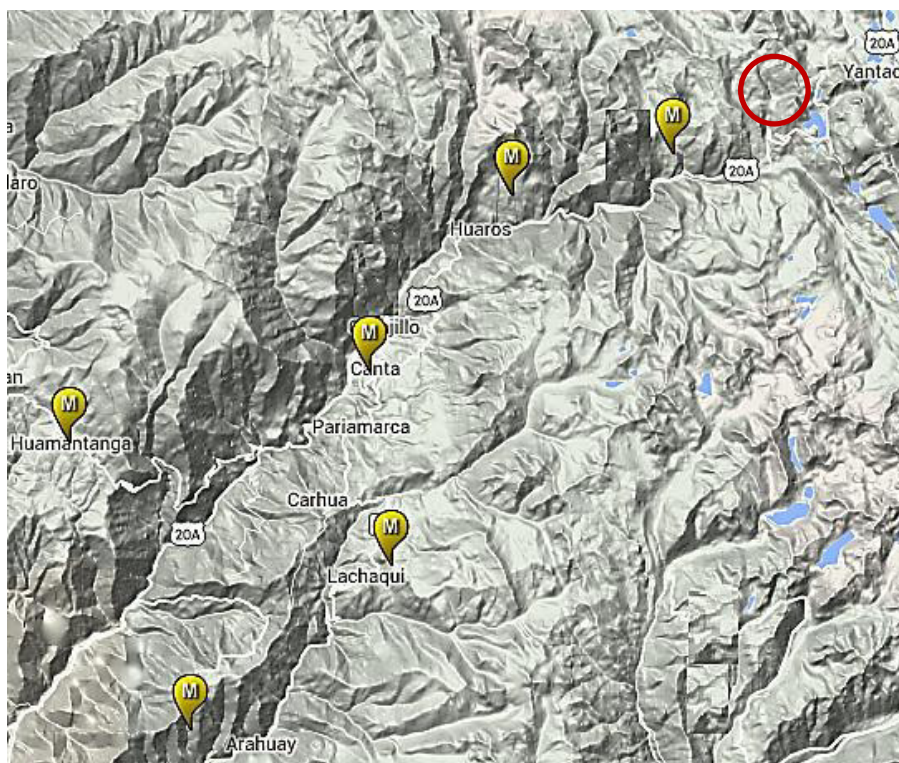
La Figura E.2 muestra la distribución espacial del NDDI de zonas cercanas al bofedal piloto, círculo blanco, en ella se ha ingresado las curvas de nivel espaciadas a 100 m. Se observa que en las zonas donde las líneas se juntan son zonas de alta pendiente y donde se separan son zonas de baja pendiente en rango azul y naranja, El patrón azul indica lugares existe que un camino o un probable camino por donde fluye el agua. Las zonas de peligro, generalmente, son quebradas secas y de alta pendiente



## Anexo F

### PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN

Para estimar la precipitación anual de la cabecera de cuenca del río Chillón se analizaron los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas de la cabecera de cuenca del río Chillón, estos datos fueron proporcionados y validados por El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Figura. F.1



**Figura. F.1** Estaciones meteorológicas obtenidas del Portal del SENMAHI fuente:  
[www.senamhi.gob.pe/main\\_mapa.php?t=dHi](http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi)  
Acceso 11/05/13

La Figura. F.1 muestra la distribución espacial de las estaciones meteorológicas en la cabecera de cuenca del río Chillón en puntos amarillos. También observamos, en círculo rojo el bofedal piloto Chunal. Los detalles de las estaciones meteorológicas se encuentran en la Tabla F.1

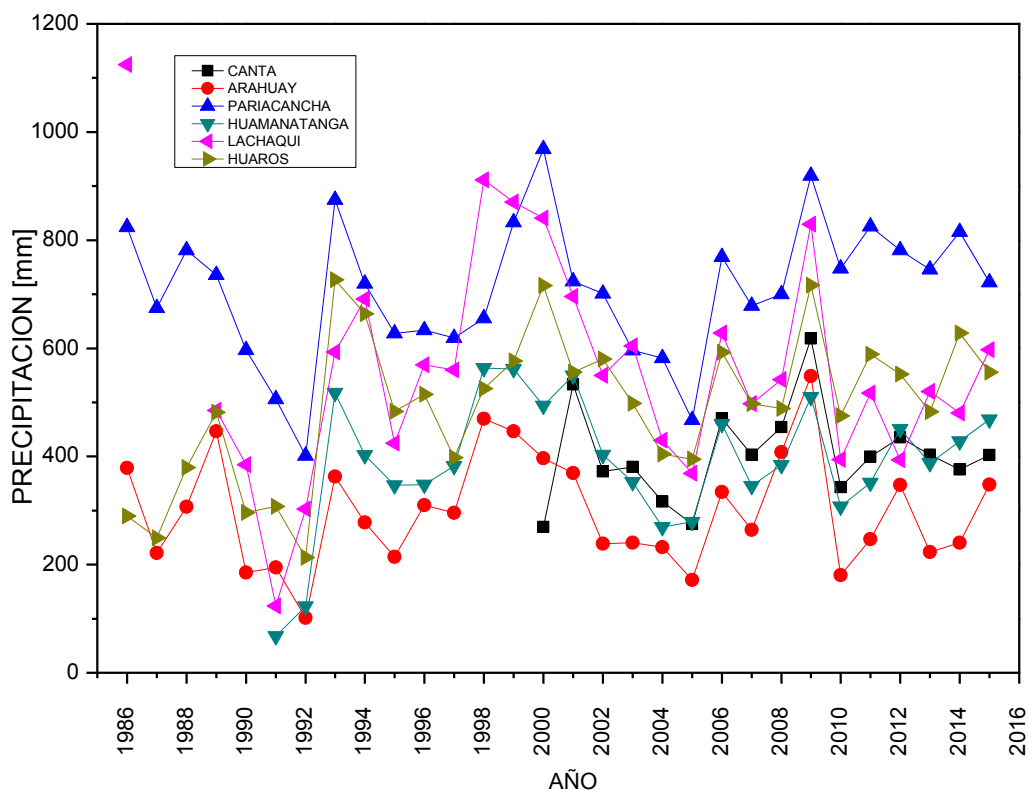
	Latitud Datum WGS84 [m]	Longitud Datum WGS84 [m]	Altura (ms.n.m) Datum WGS84 [m]	Tipo
Arahay	-11.616944	-76.70028	2690	Convencional, Meteorológica
Canta	-11.466944	-76.61694	2974	Convencional, Meteorológica
Huamantanga	-11.500278	-76.75028	3368	Convencional, Meteorológica
Huaros	-11.407444	-76.57584	3741	Automatica, Meteorológica
Lachaqui	-11.550278	-76.61694	3895	Convencional, Meteorológica
Pariacancha	-11.383611	-76.50028	4146	Convencional, Meteorológica

**Tabla F.1** Estaciones meteorológicas CRCH. Fuente: Datos obtenidos en las Estaciones meteorológicas obtenidas del Portal del SENMAHI. [www.senamhi.gob.pe/main\\_mapa.php?t=dHi](http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi). Acceso 11/05/13)

La Tabla F.1 muestra las ubicaciones de las estaciones meteorológicas de la cabecera de cuenca del río Chillón, como son su: Latitud, Longitud, altura en ms.n.m a la que se encuentran y el tipo de estación meteorológica.

### **F.1 SERIE DE TIEMPO DE LA PRECIPITACIÓN POR ESTACION DE LA CABECERA DE CUENCA DEL RÍO CHILLÓN**

A continuación se realizó una serie de tiempo para cada estaciones metereologica de la cabecera de cuenca del ríos chillón, de estas estacione las estaciones que registran datos con frecuencia diaria a partir del 1 de enero de 1986 fueron, Arahay, Pariacancha, Lachaqui, y Huaros; la estación Huamantanga registra datos desde 1991 y la estación Canta registra datos desde el años 2000. Para cada estación se calculó la precipitación anual acumulada, así se obtuvo una serie de tiempo de la precipitación, por estacione meteorológica, de la cabecera de cuenca del río Chillón para los años 1986-2015, Figura F.2.

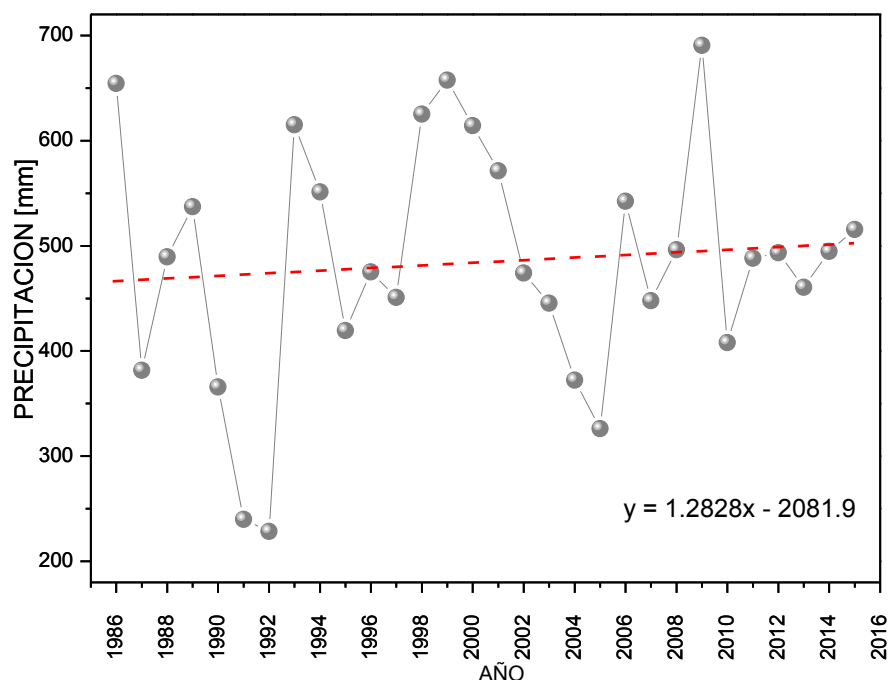


**Figura F.2.** Serie de tiempo de precipitación total promedio anual por estación meteorológica, para CRCH.  
Fuente: Datos obtenidos de las Estaciones meteorológicas obtenidas del Portal del SENMAHI.  
[www.senamhi.gob.pe/main\\_mapa.php?t=dHi](http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi). Acceso 11/05/13)

La Figura F.2 muestra una serie de tiempo de la precipitación anual de las estaciones meteorológicas. Todas siguen el mismo comportamiento, siendo la de menor precipitación promedio la de Arahua y la de mayor precipitación en la estación de Paríacancha; en relación a las 6 estaciones, estas se encuentran localizadas en la mínima y máxima altitud respectivamente. Cabe resaltar que la estación de canta registra datos a partir del 2000 y la de Huamantanga registro datos a partir del 1991.

## F.2 SERIE DE TIEMPO DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN

Para obtener una serie temporal de la precipitación en la cuenca del río Chillón se tomó el dato de las estaciones meteorológicas y se calculó el valor promedio de anual, obteniendo La seria de tiempo de precipitaciones para la cabecera de cuenca del río Chillón de los años 1986 al 2015. Figura F.3



**Figura F.3.** Serie de tiempo de la precipitación anual CRCH. Fuente: Datos obtenidos del Portal del SENMAHI. [www.senamhi.gob.pe/main\\_mapa.php?t=dHi](http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi). Acceso 11/05/13)

La Figura F.3 muestra la serie de tiempo de la precipitación promedio anual de la cabecera de cuenca del río Chillón. Se observa que los valores de precipitación varían en función del tiempo, además presente una ligera tendencia creciente, y años con valores o muy altos o bajos comparados con las demás valores.

## **ANEXO G**

### **SISTEMA DE MONITOREO, PROGRAMA AGUA-ANDES.**

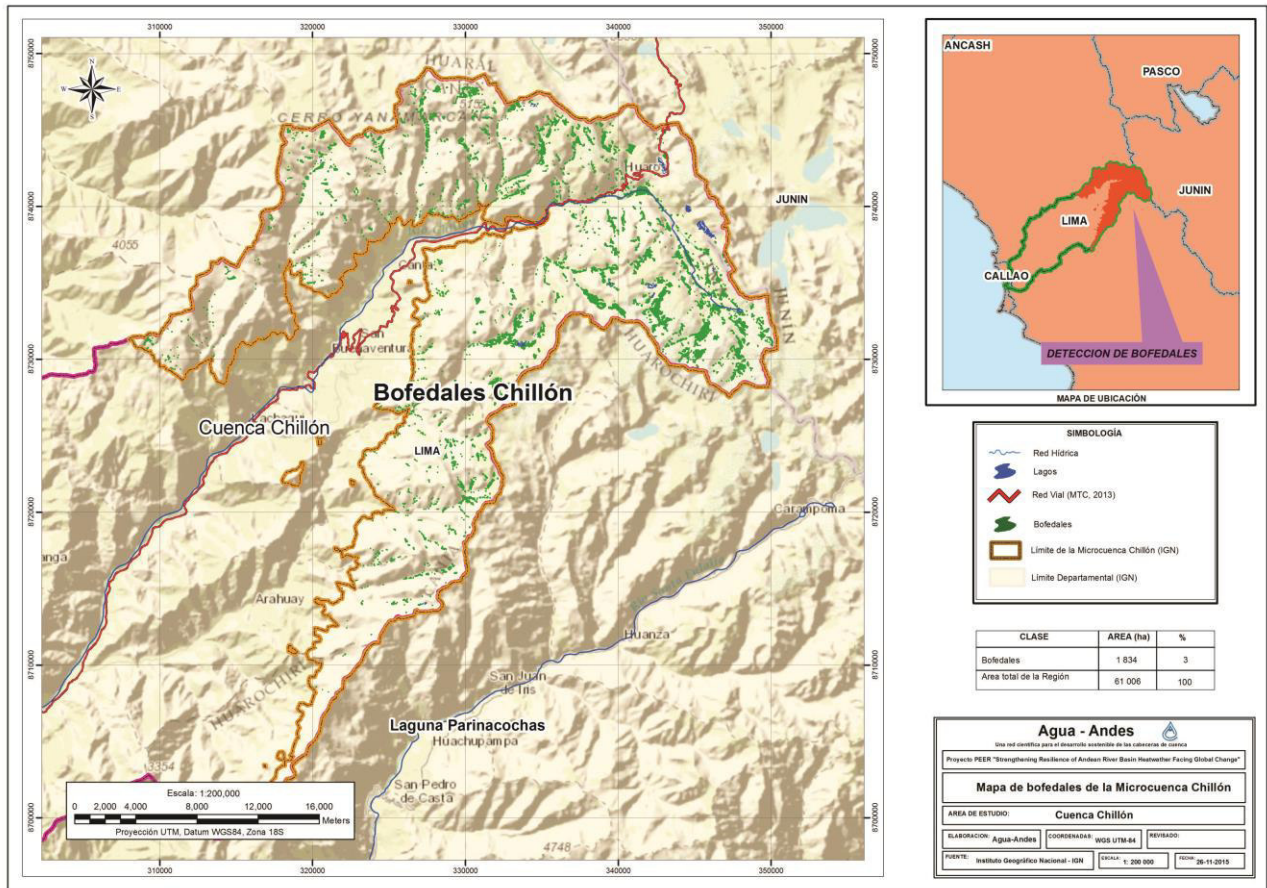
El programa Agua-Andes ha empleado la metodología de teledetección de bofedales propuesta en esta tesis, a diferentes departamentos del Perú, con el fin de implementar un sistema de monitoreo de bofedales. Fuente: <http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo>. Fecha de acceso 20/04/2017

El Programa Agua-Andes busca generar metodologías y resultados del estudio de las cabeceras de cuenca hidrográfica en los andes peruanos, zonas donde ha disminuido la disponibilidad de agua y el riesgo de sequía es mayor, también se incluye en el estudio a los humedales alto Andinos en la provisión de agua. Fuente: <http://www.agua-andes.com/quienes-somos>. Fecha de acceso 20/04/2017

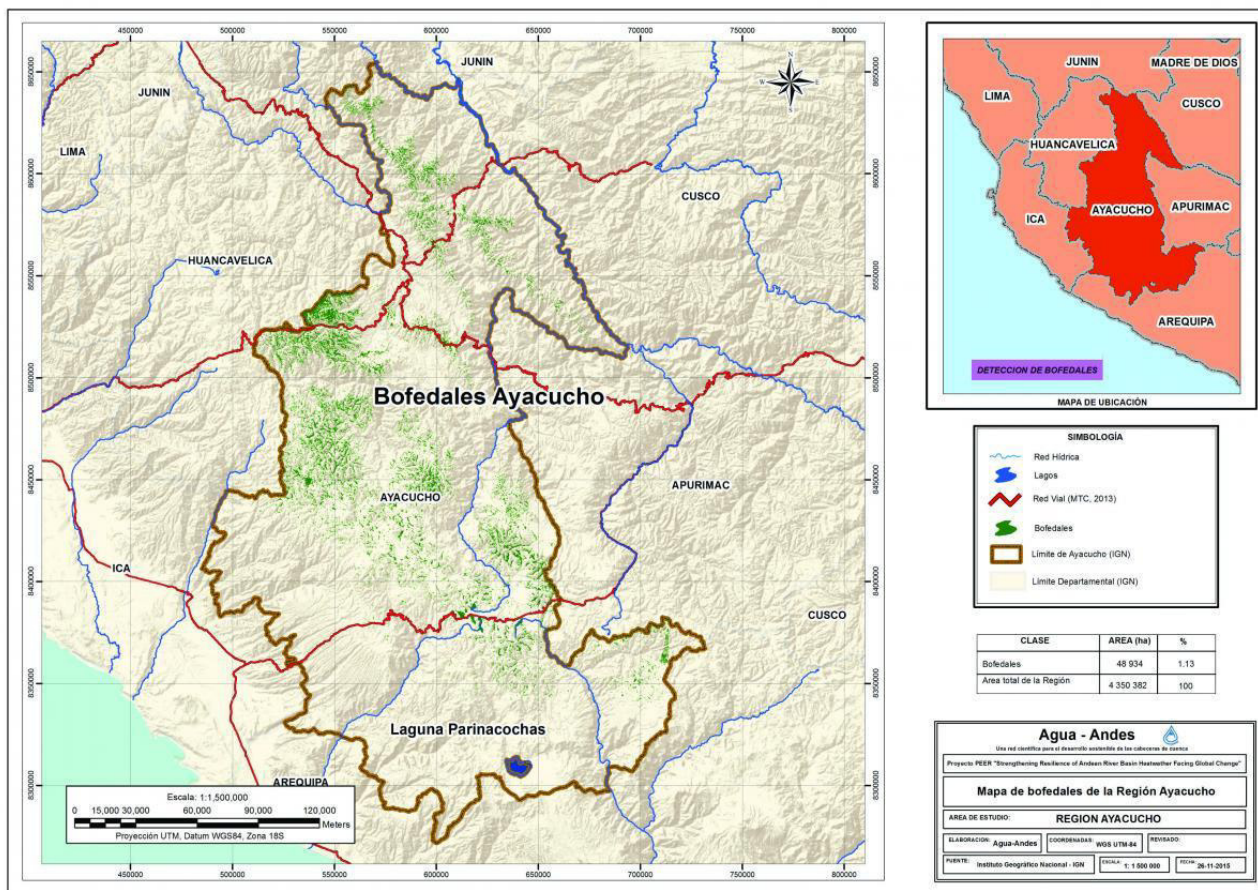
Los resultados de las investigaciones podrán ser usados en la planificación del uso del territorio, que incluye reorientación o cambio en las actividades agrícolas, extractivas y todo lo que se relacione con la disponibilidad del agua. Fuente: <http://www.agua-andes.com/quienes-somos>. Fecha de acceso 20/04/2017

A continuación se presentan algunos mapas del sistema de monitoreo empleado por el Programa Agua-Andes. Fuente: <http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo>. Fecha de acceso 20/04/2017



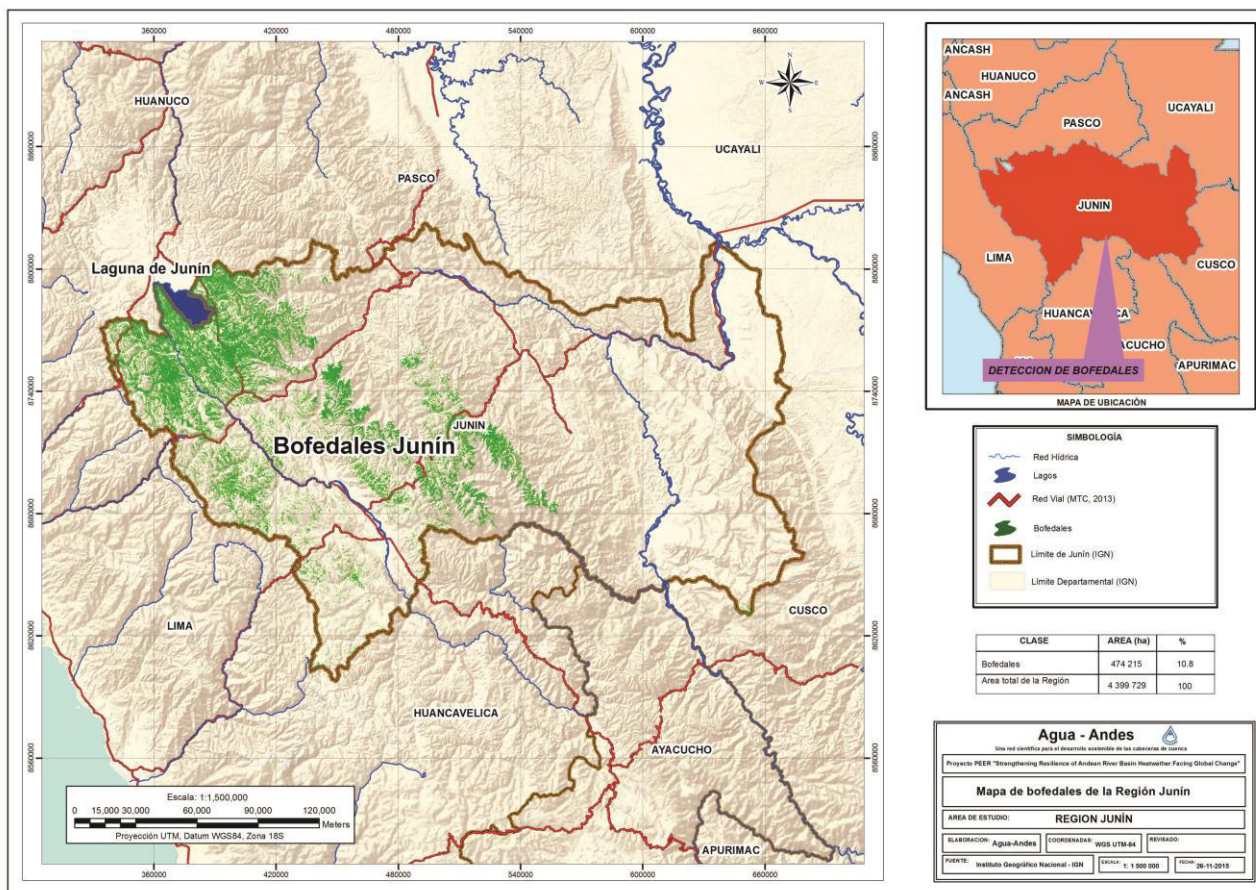


**Figura G.1.** Mapa de bofedales CRCH, Monitoreo a bojedales, Agua-Andes. <http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo> Fecha de acceso 20/04/2017

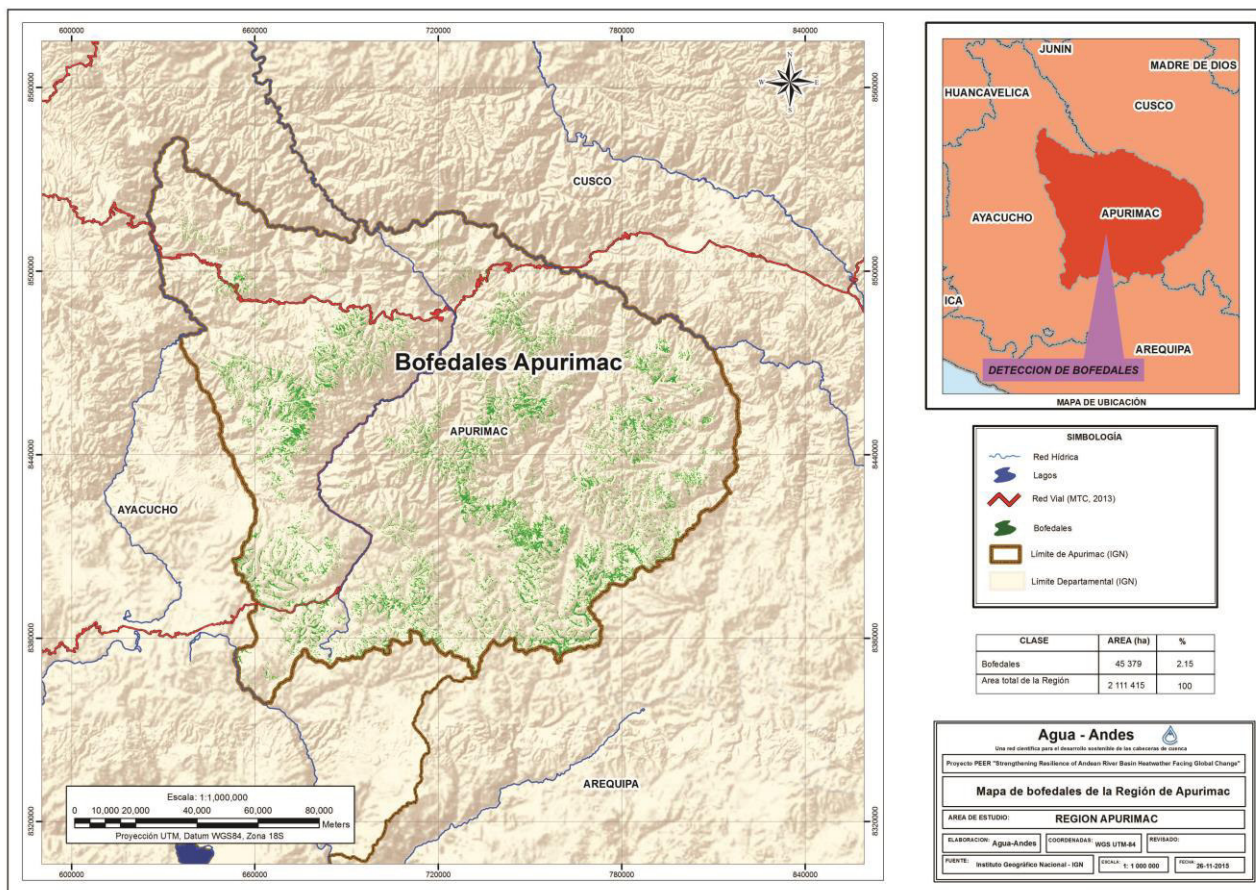


**Figura G.2.** Mapa de bofedales del departamento de Ayacucho, Sistema de Monitoreo de bofedales Agua-Andes. <http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo> Fecha de acceso 20/04/2017





**Figura G.3.** Mapa de bofedales del departamento de Junín, Sistema de Monitoreo de bofedales Agua-Andes.  
<http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo> Fecha de acceso 20/04/2017



**Figura G.4.** Mapa de bofedales del departamento de Apurímac Sistema de Monitoreo de bofedales Agua-Andes. <http://www.agua-andes.com/sistema-monitoreo> Fecha de acceso 20/04/2017

## ANEXO DIGITAL ARCHIVO

Los datos del Anexo digital Archivo pueden ser descargados en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/open?id=1D54Oe7DHGP-2ZkFE2pjUFA5QDnFaektc>